Aus der Abteilung für Zahnärztliche Chirurgie und Parodontologie

Ärztlicher Direktor: Professor Dr. W. Schulte

des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde

der Universität Tübingen

DIE TAKTILE SENSIBILITÄT BEI MARKTOTEN UND WURZELSPITZENAMPUTIERTEN OBEREN FRONTZÄHNEN

INAUGURAL - DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades

der Zahnheilkunde

dem Fachbereich Klinische Medizin

der Eberhard-Karls-Universität

zu Tübingen

vorgelegt von

THOMAS HERHOLZ

aus Oldenburg/Schleswig-Holstein

1978

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41523702_0072

Aus der Abteilung für Zahnärztliche Chirurgie und Parodontologie

Ärztlicher Direktor: Professor Dr. W. Schulte

des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde

der Universität Tübingen

DIE TAKTILE SENSIBILITÄT BEI MARKTOTEN UND WURZELSPITZENAMPUTIERTEN OBEREN FRONTZÄHNEN

INAUGURAL - DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades

der Zahnheilkunde

dem Fachbereich Klinische Medizin

der Eberhard-Karls-Universität

zu Tübingen

vorgelegt von

THOMAS HERHOLZ

aus Oldenburg/Schleswig-Holstein

1978

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Dekan:	Professor Dr. H.-E. Hoffmeister
Berichterstatter:	Professor Dr. W. Schulte

Meiner Mutter

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

1. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

1.1. LITERATURÜBERSICHT
1.1.1. Anatomischer und neurophysiologischer Überblick
1.1.2. Bisherige klinische Untersuchungen und Beobachtungen zur Tastempfindlichkeit der Zähne
1.1.3. Bedeutung der Druckinformation für das Kauorgan als funktionelle Einheit

2. EIGENE UNTERSUCHUNGEN
2.1. Versuchsaufbau
2.1.1. Der federgefesselte Drehschwinger
2.1.2. Die elektronische Messung
2.1.3. Fehlerbetrachtung der elektronischen Meßanordnung
2.2. Versuchsablauf

3. AUSWERTUNG DER MESSDATEN
3.1. Auszählung der Meßwerte
3.2. Graphische Darstellung
3.3. Bestimmung der Wurzelverkürzung aus dem Röntgenbild
3.4. Statistische Auswertung

4. UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE
4.1. Taktile Schwellen oberer mittlerer und seitlicher Schneidezähne
4.2. Das sensorische Intervall: 1. und 2. Schwelle
4.3. Die taktilen Schwellen von apikal erkrankten und später mit Wurzelspitzenamputation versorgten "WA-Zähnen" sowie von nicht behandelten Vergleichszähnen zu drei Zeitpunkten vor und nach der WA

4.3.1. Verhalten der taktilen Schwellen vor und nach der Wurzelspitzenamputation.

4.3.2. Vergleich der taktilen Schwellen marktoter Zähne vor der WA mit denen von Zähnen mit vitaler Pulpa.

4.3.3. Vergleich der taktilen Schwellen wurzelspitzenamputierter Zähne mit denen von Vergleichszähnen.

4.3.4. Mögliche Zusammenhänge der Schwellenentwicklungen beim "WA-Zahn" und beim Vergleichszahn.

4.4. Prozentualer Verlust an Wurzellänge und Ausmaß der Schwellenänderungen bei wurzelspitzenamputierten Zähnen.

5. DISKUSSION DER ERGEBNISSE

6. ZUSAMMENFASSUNG

7. ANHANG: TABELLEN DER VERSUCHSERGEBNISSE

8. LITERATURVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

"Schon seit langen Jahren spielt im zahnärztlichen, aber auch im physiologischen Schrifttum die Frage eine Rolle, welches das Empfindungsvermögen der Zähne ist. Darunter wird grundsätzlich nichts anderes verstanden, als die Grösse der Schwellenwerte, die erreicht werden müssen, um Sinnesempfindungen schwächsten Grades von den Zähnen aus hervorzurufen." (GNEUPEL 1951)
Diese Tradition geht nach GNEUPEL (1951) auf SIGMUND (1867) zurück, der die Zähne als "modificirte Tastwerkzeuge" bezeichnete.

Ein langdauernder wissenschaftlicher Streit entzündete sich an der Frage, "ob die Tasteindrücke auch aus den Zähnen selbst herrühren, oder ob diese wieder nur die Rolle eines Mittlers spielen.." (MÜNCH und SCHRIEVER 1931)

Das Problem des Empfindungsvermögens der Zähne gewinnt gerade in neuerer Zeit wieder an Bedeutung, da das Kauorgan verstärkt als funktionelle Einheit betrachtet wird, "als kompliziertes, gesteuertes und geregeltes System,das auf Informationsabgabe, Informationsverarbeitung und Informationswiedergabe zu allen aktiven Teilen des Kauorgans basiert, also ein automatisiertes, nur zum Teil der Willkürmotorik unterworfenes kybernetisches System".
Bei Zahnkontakt "kommt es zu Informationen, die wahrscheinlich über die Zahnhartsubstanz via Pulpa und über das Parodontium in Form von Druckinformationen und Richtungsinformationen an den sensorischen Trigeminuskern weitergegeben werden. Dieses System arbeitet nur, wenn alle Glieder funktionieren. Ist eines dieser Glieder gestört ..., dann ist die automatische Folge, daß diese Störung sich fortsetzen muß über den ganzen Kreis bis zur Muskelkontraktion" (SCHULTE 1972).

Nun wäre es denkbar, daß durch eine Wurzelspitzenamputation eine solche Störung bewirkt wird.
Schon HOLLSTEIN (1933) bemerkt: "Interessant ist auch die Feststellung, daß an allen resezierten Zähnen das Tastempfinden herabgesetzt ist". Er beruft sich dabei auch auf MARES (1922), der aufgrund von Messungen an zwei resezierten Zähnen diesen eine "bedeutend geringere" Tastreizschwelle beimißt.
Dieses Problem wurde meines Wissens in der späteren Literatur nicht wieder aufgegriffen, und so ist es Hauptaufgabe der vorliegenden Arbeit, nachzuprüfen, ob und in wieweit die Berührschwelle von oberen Frontzähnen durch eine Wurzelspitzenamputation einer Änderung unterworfen ist. Auch eine quantitative Aussage hierüber wird angestrebt.

1.1. LITERATURÜBERSICHT

Nach v. SKRAMLIK (1952) lassen sich die Zähne "als Einrichtungen ansehen, durch welche vorzugsweise mechanische Reize auf Empfänger im Zahnfleisch bzw. Periodontium, ggf. auch auf die Alveole übertragen werden können".

1.1.1. Anatomischer und neurophysiologischer Überblick

Der gegenwärtige Kenntnisstand über die Neurophysiologie der anatomisch-funktionellen Einheit Periodontium:
Es stellt einen echten syndesmotischen Verband aus kollagenen Faserbündeln dar, die in Ruhelage leicht gewellt sind. Die Hauptmasse der Ligamenta alveolo-dentales verläuft in schräger Richtung, an der Wurzelspitze beobachtet man aber eine strahlenförmige Anordnung entsprechend der allseitigen Beweglichkeit. Damit wird der Kaudruck in einen auf die Alveolenwand wirkenden Zug umgewandelt. (SCHUMACHER 1962)
Die Gefäße und Nerven liegen als gemeinsame Bündel in den Gefäßnervenspalten oder -lücken der Wurzelhaut. Durch Anastomosen und Endschlingen bilden die Gefäße eine "hydraulische Bremse" gegen brüske Bewegungen bei Belastung. Die Nerven bilden zunächst markhaltige Bündel, verlieren mit der Aufteilung ihre Hüllen und laufen mit einfachen freien Spitzen gegen das Zement aus. (MEYER 1958, SCHUMACHER 1962)

"Der Zahnhalteapparat hat im wesentlichen eine mechanisch-statische Aufgabe zu erfüllen. Er verankert den Zahn im Kiefer und überträgt den beim Kauakt auftretenden Druck ... Beim Versuch, einen möglichst hohen Kaudruck zu erzeugen, verhindert die Sensibilität der Wurzelhäute und des Zahnfleisches reflektorisch eine weitere Drucksteigerung." (SCHUMACHER 1962)

Andererseits aber können die Wurzelhautfasern "ihren regelrechten Bau nur erhalten und behalten, wenn der Zahn vornehmlich eine ausreichende achsengerechte Belastung erfährt ..." (FRÖHLICH 1958)

"Druck- und Vibrationsempfindungen, die wir scheinbar mit den Zähnen wahrnehmen, gehen von den äußerst empfindlichen Empfängern der Wurzelhaut aus." (HENSEL 1958)

Solche Empfänger oder Rezeptoren sind nach FEKETE (1963) "spezielle Strukturen, welche auf die Reize der äußeren und inneren Umgebung reagieren und die entstandenen Impulse über die afferenten Nerven zum Zentralnervensystem weiterleiten".
Nach HENATSCH (1962) bestehen alle Rezeptoren aus einem Endorgan (Meßfühler) und einer konduktilen, immer marklosen Nervenfaser.
Physikalisch gesehen stellen sie Transduktoren (Energiewandler) dar.
"Diejenige Energieart, der gegenüber die Reizschwelle des gegebenen Rezeptors am niedrigsten ist, bezeichnen wir als den adäquaten Reiz." (FEKETE 1963)
"Der adäquate Reiz für die Erregung der Drucksinnesempfänger ist eine mechanische Deformation." (HENSEL 1958)
Ein Reiz ruft "in der zugehörigen Rezeptorzelle eine langsame Potentialschwankung hervor, die als Generatorpotential bezeichnet wird ... Erst am Beginn der nachgeschalteten Nervenfaser wird die zeitabhängige Potentialschwankung der Rezeptorzelle in eine Serie gleichhoher Nervenaktionspotentiale umgewandelt. Eine Erhöhung der Reizintensität bewirkt dabei eine Steigerung der Impulsfrequenz." (CASPERS 1970)
Damit stellt die Rezeptorzelle einen "Codierungsapparat" dar, der den Reiz aus einer "kontinuierlich analog verschlüsselten" in eine "diskret analog verschlüsselte Informationsform" umwandelt. (KEIDEL 1970)

Grundlegende Angaben über die Pressorezeptoren im periodontalen Gewebe machten BERKELBACH van der SPRENKEL (1936) und LEWINSKY und STEWART (1937). Jener beschrieb sie als "End-Ringe", letztere als "knopfähnliche, fusiforme Endigungen", was von SIMPSON (1966) bestätigt wurde. Elektronenmikroskopisch fanden WILSON und SILVA (1965) sowie GRIFFIN und HARRIS (1968), daß die unmyelinisierten Nervenendigungen im Paro dontium Durchmesser zwischen 0,3 µm (bzw. 0,4 µm) und 1 µm aufweisen.
Eine genaue Beschreibung und Klassifizierung der periodontalen Rezeptoren verdanken wir wiederum GRIFFIN und HARRIS (1974).
Sie unterscheiden:

1. Einfache Mechanorezeptoren von ca. 10 µm x 10 µm Größe, die aus markhaltigen Nervenfasern bestehen, von Schwann'schen Zelleibern umgeben sind und schließlich als unmyelinisierte, umkapselte Nervenfasern enden. Sie entsprechen wohl den oben erwähnten Endknöpfen.

2. Die zusammengesetzten Mechanorezeptoren sind ca. 35 µm x 45 µm groß und bestehen aus markhaltigen Nervenfasern, die von marklosen umgeben werden. Sie dürften den Endringen BERKELBACHs entsprechen.

3. Die Mechanorezeptorkomplexe sind ca. 100 µm x 150 µm groß und entsprechen einer Anhäufung von zusammengesetzten Mechanorezeptoren.

Die Blutversorgung erfolgt nach GRIFFIN und SPAIN (1972) bei den einfachen Mechanoreptoren durch Diffusion, bei den komplexeren durch jeweils eine eigene Metarteriole.

Eine andere Klassifikation wurde nach physiologischen Gesichtspunkten versucht. Dabei spielt die Adaptationsfähigkeit der Rezeptoren eine große Rolle. Nach HENSEL (1970) tritt bei zeitlich konstantem Druck "nach kurzer Zeit eine Adaptation der Mechanorezeptoren ein, die sich elektrophysiologisch in einer Abnahme der Impulsfrequenz äußert."

CATTON (1970) sieht zwei mögliche Adaptationsmechanismen: 1. Adaptation des Rezeptorenpotentials. 2. Adaptation des Spitzenentlandungen hervorbringenden Mechanismus.
Schon PFAFFMANN (1939), der die ersten elektrophysiologischen Studien an von Pulpa und Parodont abführenden Nerven der Katze betrieb, fand schnell und langsam adaptierende Rezeptoren, sowie spotanaktive Einheiten. Die schnell adaptierenden Rezeptoren zeigten eine höhere Reizschwelle und ein kleineres Frequenzmaximum der Entladung.
Seine Klassifikation wurde von NESS (1954) bestätigt.
JERGE (1963) klassifizierte zwei Typen parodontaler Rezeptoren:

Typ I - langsamer adaptierend mit Schwellen zwischen 1 und 3 g (bzw. zwischen 9,81 und 29,43 mN),
Typ II - schneller adaptierend mit Schwellen zwischen 2 und 6 g (bzw. zwischen 19,62 und 58,86 mN)

Schnell wie langsam adaptierende Rezeptoren seien im mesencephalen Trigeminuskern repräsentiert, die ganz langsam adaptierenden aber im Ganglion Trigeminale.

Eine Zuordnung der physiologischen Erkenntnisse zu den histologischen Gegebenheiten versuchten HARRIS und GRIFFIN (1974). Danach sind die einfachen Mechanorezeptoren wahrscheinlich schnell adaptierende Einheiten. Sie vermitteln den Kieferöffnungsreflex.
Die Spontanentladungen sind demnach auf zusammengesetzte Mechanorezeptoren und auf Mechanorezeptorkomplexe zurückzuführen.
Erstere werden durch Spannung der kollagenen Fasern oder der myelinisierten Nervenfasern erregt und sollen den Spannungsrezeptoren im Skelettmuskel ähneln. Bei den letzteren soll es sich um Druckrezeptoren handeln, die den periodischen Blutdruck registrieren.
Nach GRIFFIN und SPAIN (1972) laufen die Spontanentladungen synchron zum EKG ab.
ANDERSON (1969) gibt zu bedenken, daß die Prüfung der Rezeptoreigenschaften schwierig sei, da ihre Lokalisation im Parodontium

eine Abwandlung der Reize durch umgebendes Gewebe befürchten lasse. So soll auch die Spontanaktivität keine direkte Rezeptoreigenschaft sein, sondern durch die Lokalisation in einem Gebiet kontinuierlicher Spannung bedingt sein. HANNAM (1969) zieht generell den Schluß, daß die Variation der Aktivitätsformen periodontaler Mechanorezeptoren auf die Lokalisation im Periodontalspaltgewebe zurückzuführen sei. Die langsam adaptierenden Rezeptoren seien mit dem Reiz mehr elastisch gekoppelt, die schnell adaptierenden mehr viskös. Damit sei auch die große Streuung der Schwellenwerte bei elektrophysiologischen Untersuchungen erklärt, denn das ableitende Nervenbündel versorgt Rezeptoren mit sowohl viskös als auch elastischer Kopplung an den Reiz.

Elektrophysiologische Untersuchungen von KIZIOR (1968) an UK-Eckzähnen von Katzen ergaben auf Berührung zusammengesetzte, diphasische Potentiale, deren Höhe von Kraftgröße und -richtung abhängig war. So führte incisaler Druck zu größeren Potentialen als labialer, was KIZIOR mit der Lokalisation der Rezeptoren hauptsächlich im apikalen Wurzeldrittel erklärt.
Er unterscheidet zwei grundsätzliche Antwortniveaus:
1. Antworten auf Kraftreize kleiner als 500 p (≙ 4,905 N),
2. Antworten auf Kraftreize über 1 100 p (≙ 10,791 N),
zurückzuführen auf freie Nervenendigungen, die wahrscheinlich in Schmerzfasern übergehen.

Nach HANNAM (1967) verändert sich die Antwort parodontaler Rezeptoren allerdings nicht nur mit der Größe der Last, sondern auch mit der Geschwindigkeit, mit der sie appliziert wird.

YAMADA (1967) stellte eine Korrelation fest zwischen der Aktivität der Mechanorezeptoren und einer kontrollierten Verschiebung des Zahnes.

Er fand, daß eine Intrusion von 2 - 3 µm nötig ist, um eine

Antwort in Form von Impulsen zu erhalten. Dies schien unabhängig vom Zahntyp zu sein. Doch wurde bei Molaren eine größere Kraft dafür benötigt, da sie kräftiger im Zahnfach verankert sind als zum Beispiel Incisivi.

Zur Innervation der angesprochenen Rezeptoren schreibt HENSEL (1958), die Drucknervenfasern der Wurzelhaut seien "dicke, markhaltige Nervenfasern der Aβ-Gruppe von 8 - 15 µ Durchmesser und 40 - 70 m/sec Leitungsgeschwindigkeit ... Die Druckfasern des Trigeminus enden vorwiegend im Nucl. terminalis. Von dort ziehen gekreuzte Fasern mit der medialen Schleife (Tract. bulbothalamicus) zu den lateral gelegenen Partien des Nucl. ventralis posteromedialis im Thalamus. Die zentrale Repräsentation in der Großhirnrinde liegt in den kaudalen Abschnitten des Gyrus postcentralis."
HARRIS und GRIFFIN (1974) ergänzen, daß besonders die langsam adaptierenden und spontanentladenen Einheiten neben ihren Verbindungen zu den Nuclei mesencephalicus, principalis centralis und tractus spinalis (nervi trigemini) noch Beziehungen aufweisen zur Formatio reticularis des Hirnstamms und schließlich zum motorischen Kern des Nervus Trigeminus.

1.1.2. Bisherige klinische Untersuchungen und Beobachtungen zur Tastempfindlichkeit der Zähne

TÜRKHEIM (1920) war nach Aussage GNEUPELs (1951) der erste, der Schwellenwerte für das Auftreten von Berührungsempfindungen an Zähnen ermittelte. Nach ihm sind solche Messungen mit den verschiedensten Methoden durchgeführt worden.
Zu unterscheiden sind Messungen von absoluten Druckschwellen wie sie von TÜRKHEIM (1920), MÜNCH und SCHRIEVER (1931), ADLER (1947), GNEUPEL (1951), LÖWENSTEIN und RATHKAMP (1955), WILKIE (1964) u.a. versucht wurden und Untersuchungen darüber, welche Dicken von Objekten (Folien oder Drähten) zwischen den Zahnreihen wahrgenommen bzw. unterschieden werden können.

(THEIL 1931, HOLLSTEIN 1933, KAWAMURA und WATANABE 1960, TRYDE et. al. 1962, SIIRILÄ und LAINE 1963 u.a.)
Weitere Autoren beschäftigen sich mit der Lokalisation und Unterscheidung von Druckreizorten auf den Zähnen (RASCH 1951, STARKE 1952, HASSENSTEIN 1951 u.a.)
MÜNCH und SCHRIEVER (1931) prüften die Zahnempfindlichkeit auf verschiedenste Reize und maßen an Schneide- und Eckzähnen Druckschwellen von 1 bis 1,5 g, selten bis 2 g ≙ 9,81 mN bis 14,715 mN, selten bis 19,62 mN (Reiz senkrecht auf labiale Fläche appliziert). Sie werten die Zähne an sich als "ein äußerst primitives Sinneswerkzeug", da sie "nur eine einzige Empfindungsmodalität, nämlich Schmerz vermitteln". Allerdings wird eingeräumt: "gleichwohl haben sie für die Vermittlung von Sinneseindrücken ... große Bedeutung, insofern als sie noch indirekt hierbei mithelfen. Vor allem unterstützen sie so die Wahrnehmung von Tasteindrücken."

In diesem Zusammenhang erinnert GNEUPEL (1951) an den Weber'schen Stäbchenversuch: "Die Tatsache, daß wir Empfindungen, die durch Berührung der Taststäbchen in den Rezeptoren des Halteapparates dieser Taststäbchen erzeugt werden, nicht in die Rezeptoren selbst verlegen, sondern weiter hinaus an diejenige Stelle, wo die freie Spitze des Taststäbchens mit dem Gegenstand der Umwelt in Verbindung tritt, ist ein Ausdruck für das Gesetz von der exzentrischen Projektion der Empfindungen ... Hier verlegen wir die Druckempfindungen vornehmlich an diejenige Stelle, an der der Zahn berührt wird ..."

GNEUPEL wie auch MÜNCH und SCHRIEVER arbeiten mit sog. v. Frey'schen Reizhaaren, die aber nicht nach Spannungs- sondern nach Kraftwerten geeicht sind, denn "die Fläche, auf die der Reiz wirkt, wird ja hier nicht durch den Querschnitt bzw. Radius des Haares bestimmt, sondern durch die Projektion des Zahnfaches bzw. des auskleidenden Periodontiums auf eine zur Richtung der Kraft senkrechten Ebene." (MÜNCH und SCHRIEVER 1931)
Die Autoren stellen übereinstimmend fest, daß die Schwellen-

werte von den Incisivi zu den Molaren nach distal hin ansteigen.
"Diese Tatsachen lassen sich mit der sogenannten Wurzelfestigkeit der Zähne ohne weiteres in Einklang bringen, denn diese Wurzelfestigkeit ist bei den Backenzähnen zweifellos sehr viel größer als bei den Schneidezähnen ..." (v.SKRAMLIK 1952)
Der Schwellenanstieg bei mehr distal gelegenen Zähnen wird auch von ADLER (1947) gefunden. Er arbeitet aber mit einem Gnathodynamometer für axiale Druckapplikationen und einer Art Federwaage für laterale. Er sieht 3 verschiedene Empfindungen, die von der Größe der wirkenden Kraft abhängen: Berührung, Druck oder Last, Schmerz.
ADLER stellt bei seinen Versuchen mit verschiedenen Kindergruppen Geschlechts- und Altersunterschiede der Schwellenwerte fest. (Bei männlichen und älteren Versuchsgruppen höhere Schwellen.)
Er gibt aber zu, daß die Empfindungen schwer beschreibbar sind, eine große individuelle Variabilität besteht und daher Vergleiche nur für jede Versuchsperson einzeln möglich sind.

Solche individuellen Schwankungen hat schon HOLLSTEIN (1933) festgestellt, der allerdings vom Dickenunterscheidungsvermögen ausgeht und weitgehend die Versuche von THEIL (1931) nachvollzieht.
So kommt er zu den Schluß, "daß Patienten, die an Stoffwechselstörungen litten ... auch ein vermindertes Empfinden hatten ... Herabgesetztes Dickenunterscheidungsvermögen zeigten häufig ältere Patienten ...
Im Gegensatz zu den Patienten mit herabgesetzten Empfindungen stehen andere, die einen hypersensibelen Eindruck machen und ein über dem Durchschnitt liegendes Dickenunterscheidungsvermögen aufweisen".
HOLLSTEIN meint weiter, "daß das spezielle Tastgefühl der Zähne zum allgemeinen Tastempfinden im bestimmten Verhältnis steht."

Weitere Abhängigkeiten der Schwellenwerte sieht er von Beruf, Intelligenz, Aufmerksamkeit, Ermüdbarkeit und Konzentrationsfähigkeit der Versuchspersonen.
Der Einfluß des Geschlechts auf die Dickenunterscheidung wird von SIIRILÄ und LAINE (1963) für statistisch nicht signifikant gehalten.
SCHNELL (1976) untersuchte die Taktilität der Zähne in Abhängigkeit vom Tagesablauf und stellt fest, "daß sie in den späten Nachmittagsstunden signifikant am höchsten und in der Mittagszeit am niedrigsten ist, vorausgesetzt, daß es sich um einen normalen Arbeitstag handelte." Er nimmt an, "daß die Schwankungen der Zahntaktilität im Zusammenhang mit der unterschiedlichen Durchblutung der Parodontien steht ..."

LÖWENSTEIN und RATHKAMP (1955) benutzten zur Druckschwellenmessung ein neues Federmeßgerät mit einer Genauigkeit von $\pm$ 4 - 5 g, das sein Druckmaximum in weniger als 2 m sec erreicht.
Hiermit waren genauere Messungen als mit Reizhaaren möglich. Bei axialer Belastung war die Schwelle für den oberen 1er 0,948 g, für den oberen 2er 1,094 g. Die Schwellen steigen nach distal an bis zum 6er (4,875 g). Im UK zeigten sich etwas geringere Werte, was aber statistisch nicht signifikant war (1 g $\hat{=}$ 9,81 mN).
Für die Frontzähne wurden diese Ergebnisse von WILKIE (1964) mit der gleichen Apparatur im Wesentlichen bestätigt.

Nach LÖWENSTEIN und RATHKAMP zeigte sich beim Vergleich von vitalen mit marktoten lern ein signifikanter Schwellenanstieg von 57%.
Auch ein Vergleich von normalen mit Zähnen, die mit Metallkäppchen versehen waren, zeigte einen signifikanten Schwellenanstieg.
Damit sei ein Beweis für intradentale wie für periodontale Pressorezeptoren gegeben.

Hiermit wurde die These von der Eigenempfindlichkeit des Zahnes wieder vertreten, die STEINER (1902) schon früh geäußert hat, aber die seit TÜRKHEIM (1920) von den meisten nachfolgenden Autoren verworfen wurde.
"Wenn tote Zähne die gleiche oder fast gleiche Tastschwelle haben wie lebende, ist es wohl höchst unwahrscheinlich, daß die Zähne selbst überhaupt jemals etwas mit der Aufnahme von Tasteindrücken zu tun haben." (MÜNCH und SCHRIEVER 1931)

Die meisten Autoren hielten die Rezeptoren im Parodont für ausschlaggebend für die Druckperception und die Zähne nur für Übermittler im Sinne der Weber'schen Stäbchen. (THEIL 1931, HOLLSTEIN 1933, ADLER 1947, GNEUPEL 1951, v. SKRAMLIK 1952, HENSEL 1958, KRAFT 1962)

Hier spielt die Frage nach einer möglichen Innervation der Zahnhartsubstanzen hinein.
STEWART (1927) referiert über die sog. Fasern von Mummery, die von Nervenzellen unter der Odontoblastenschicht ausgehen sollen.
Er kann sie zwar nicht nachweisen, will aber eine Innervation des Dentins von Pulpa oder Wurzelhaut aus, nicht ausschließen.

Jedenfalls seien die Pulpanerven hauptsächlich für Schmerz-, periodontale Nerven für Druckübertragung verantwortlich.
"Dennoch scheint das Ergebnis verschiedener Arbeiten ... wirklich nervöse Fibrillen zu bestätigen, die in die Dentinkanälchen eindringen ..." (HELD 1947)
Nach BOCK (1960) ist aber nur das Eindringen einzelner Nervenfasern in Odontoblastenzellen sowie auch in das Praedentin nachgewiesen. "Hierdurch wird der Odontoblast zu einer Vermittlungsstelle, denn er nimmt die auf das Dentin einwirkenden Reize durch die Tomes'schen Fortsätze auf."

Da in peripherem Dentin keine Nervenfasern nachgewiesen werden konnten, hält BRÄNNSTRÖM (1966) eine Flüssigkeitsverschiebung innerhalb der Dentinkanälchen für den entscheidenden Faktor.

Auch SAUERWEIN (1972) nimmt eine Druckübertragung via Odontoblastenfortsatz für den wahrscheinlichsten Weg der Schmerzauslösung an.

Es wird in diesem Zusammenhang aber immer nur von Schmerz, nie von der Berührungsempfindung geschrieben (STEWART 1927, BOCK 1960, BRÄNNSTRÖM 1966, SAUERWEIN 1972).

Neuere Untersuchungen von MARTINKO (1968) über Druckbelastungsgrenzen von Zähnen schienen zu beweisen, "daß die Rezeptoren für die Wahrnehmung der Belastungsgrenze des Zahnes in der Nähe der Zahnoberfläche und im Bereich der Nervenendigungen der Zahnpulpa liegen müssen."

In ähnlichen Versuchen zur "maximalen Beisskraft erhielten BOLLINGER und LUKAS (1974) aber gegensätzliche Ergebnisse und betonen, nicht feststellen zu können, "daß die maximale Beisskraft überhaupt einen wiederholbaren Rückschluß auf das Vorhandensein von Sensoren in der Zahnhartsubstanz gestattet."

1.1.3. Bedeutung der Druckinformation für das Kauorgan als funktionelle Einheit

Unbestritten ist, daß die parodontalen Rezeptoren eine wichtige Rolle spielen bei der reflektorischen Kieferöffnung (JERGE 1964, HANNAM und MATTHEWS 1969, ANDERSON 1969) und bei der reflektorischen Steuerung des Kauvorgangs (HENSEL 1958, LULLIES 1960, SCHULTE 1967).

Die vielfältigen Informationen beim Zahnkontakt beschreibt SCHULTE (1972): "Gelangt zum Beispiel ein Speisebrocken zwischen die Zähne, so informieren parodontale Rezeptoren

a) daß dies der Fall ist
b) über die Richtung der Belastung

c) über die Größe der Belastung
d) über die Beschaffenheit des gekauten Mediums".

Nach LULLIES (1960) ist auch die Ruhespannung der Kaumuskulatur "weitgehend von der Erregung peripherer Rezeptoren abhängig."
Darunter werden Rezeptoren verstanden, "die als 'Muskelspindeln' im Muskel selbst oder als Druck- und Schmerzrezeptoren in der Haut und in den Schleimhäuten, aber auch in den tieferen Geweben, z.B. in den Gelenken und in der Wurzelhaut der Zähne gelegen sind."

"Indirekte und direkte Zahnkontakte führen zur Erregung der parodontalen Rezeptoren und damit zur Kontraktion ... Ohne parodontale Rezeptorenerregung gibt es keine isometrische Kontraktion." SCHULTE (1967)

Die Wurzelspitzenamputation, zur Beseitigung der apikalen Parodontitis, die von PARTSCH (1896) als allgemeingebräuchliche Operation eingeführt wurde, könnte u.a. einen Eingriff in dieses System darstellen, zumal nach KIZIOR (1968) die parodontalen Rezeptoren hauptsächlich im apikalen Wurzeldrittel lokalisiert sein sollen.

Da diese Rezeptoren zumindest zum Teil verlorengehen, erscheint ein wurzelspitzenamputierter Zahn als ein geeignetes Objekt zur Bestimmung der im Vergleich zum gesunden Zahn mit vitaler Pulpa möglicherweise veränderten Taktilität.

2. EIGENE UNTERSUCHUNGEN

2.1. Versuchsaufbau

Bei früheren Messungen der Berührschwelle wurden v. Frey'sche Reizhaare (MÜNCH und SCHRIEVER 1931 u.a.), ein Gnathodynamometer (ADLER 1947), sowie ein Federmeßgerät (Ästhesiometer, LÖWENSTEIN und RATHKAMP 1955) verwendet.
Alle Geräte arbeiteten mechanisch und zwar sowohl das kraftausübende wie das messende System.
Die Methoden waren ungenau, weil Kraftimpulse mit zufälligem Verlauf erzeugt wurden.
Folgende Forderungen waren an ein neues Gerät zur Messung taktiler Schwellen oberer Frontzähne zu stellen:

- Die Messung soll hinlänglich genau sein: Der objektive Fehler darf den subjektiven nicht überschreiten.
- Die Messung soll elektronisch erfolgen: Damit ist der Meßfühler räumlich vom Meßgerät zu trennen und kann klein gehalten werden.
- Der Kraftanstieg soll reproduzierbar und ständig graphisch zu überwachen sein: Damit sind exakte Vergleichsmessungen möglich.
- Der Meßfühler soll prellfrei auf die incisale Zahnfläche aufgesetzt werden können, sowie physiologische Bewegungen des Kopfes (durch Pulsschlag und Atmung) beim Meßvorgang ausgleichen.
- Die Geschwindigkeit des Kraftanstiegs soll gleichmäßig sowie frei wählbar sein.
- Die Gerätschaften sollen einfach zu handhaben sein.

2.1.1. Der federgefesselte Drehschwinger

Diese Forderungen erfüllt der "federgefesselte Drehschwinger", der von MÜHLBRADT, LUKAS und JENZ (1976) konstruiert wurde.
Er besteht aus einem mechanischen und einem elektronischen Baustein.
Ein ca. 2 cm langer, kaum streichholzdicker, zylindrischer Kraftfühler sitzt an der Spitze eines 30 cm langen, grazilen Metallrohres, das über ein Kugellager mit einem heb- und senkbaren Stativ verbunden ist. Dieser Meßarm wird über zwei Spiralfedern in der Waagerechten gehalten (s. Abb. 1) Dadurch ist ein prellfreies Aufsetzen möglich, außerdem werden leichte Kopfbewegungen ausgeglichen.
Der Kraftarm ist über eine weitere Spiralfeder und einen Faden mit der Achse eines elektrischen Getriebemotors verbunden, dessen konstant einstellbare Frequenz eine gleichmäßige Dehnung der Feder und somit einen konstanten Anstieg der Federkraft zur Folge hat.
Durch Änderung der angelegten Gleichspannung kann der gewünschte Kraftanstieg eingestellt werden.
Wir wählten für alle Messungen eine Kraftanstiegsgeschwindigkeit von 2 mN/sec.

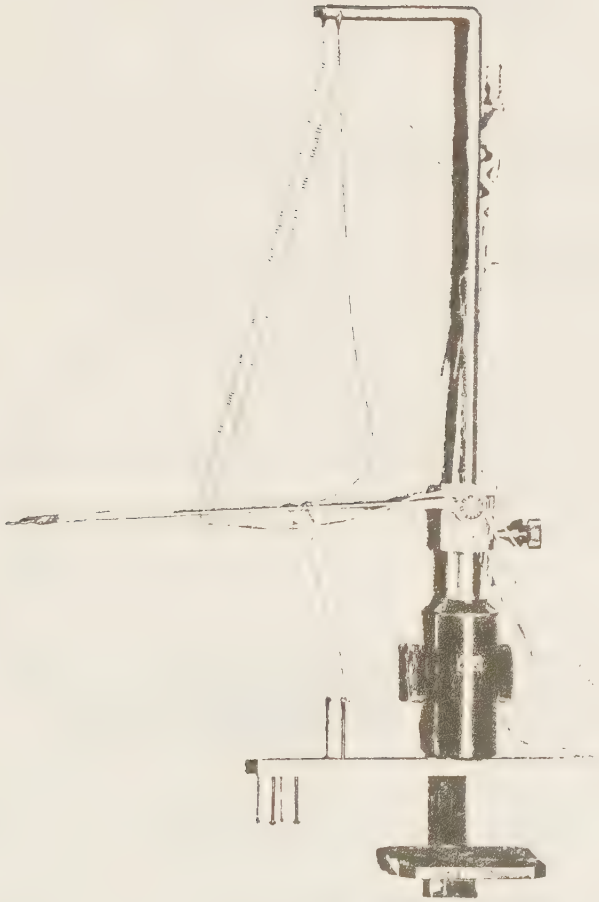


Abb. 1: Der federgefesselte Drehschwinger.
Der waagrechte Meßarm ist kugelgelagert an einem Mikroskopstativ befestigt. Er wird durch eine Feder im Gleichgewicht gehalten. Da die Reibungskräfte im Kugellager gering sind, kann der Meßarm beim Meßvorgang trägheitsfrei den physiologischen Bewegungen des Zahnes folgen.

2.1.2. Die elektronische Messung

Die elektronische Messung des Kraftanstiegs beruht auf dem Piezo-Effekt, durch den Druckschwankungen in elektrische Stromschwankungen umgewandelt werden.
Zwei piezo-resistive Halbleiterelemente sitzen auf dem hinteren Ende einer ca. 2 cm langen Nadel, die mit einem Kunststoff isoliert ist. Sie werden durch die über die Nadel übertragene mechanische Belastung gegeneinander verbogen und ändern dabei ihren elektrischen Widerstand.
Durch die Hebelwirkung der Nadel können noch Kräfte unter 1 mN aufgelöst werden.
Die Halbleiterelemente der Firma E n de v k o haben eine Abmessung von ca. 2 x 1 mm und sitzen auf einem Träger von 1,5 x 10,5 mm Grundfläche (s. Abb. 2).

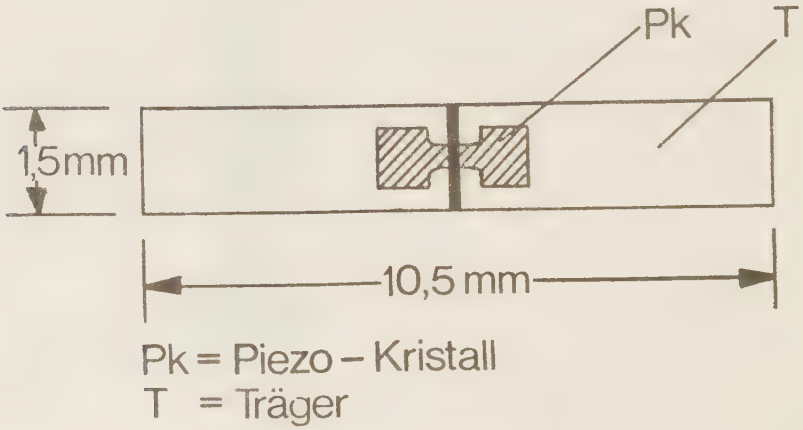


Abb. 2: Piezo-resistives Halbleiterelement.
Das Halbleiterelement ist auf einem Träger (T) mit den Ausmaßen 1,5 mm x 10,5 mm befestigt. Der eigentliche Piezo- Kristall (PK) in der Mitte des Trägers mißt nur etwa 1 mm x 2mm.

Um mit ihnen Kräfte zu messen, werden sie in der Anordnung einer Wheatstone'schen Halbbrücke geschaltet (s. Abb. 3).

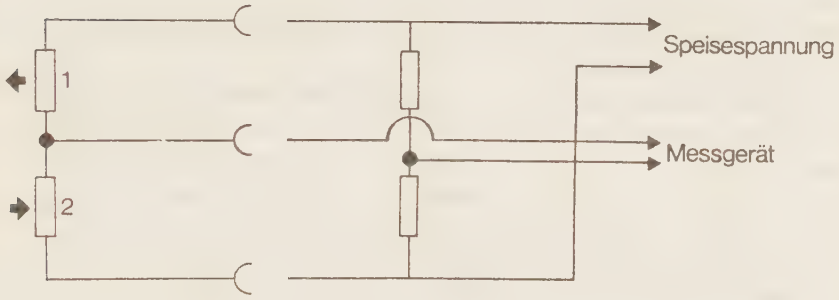


Abb. 3: Schaltung der Piezo- Kristalle (1 u. 2) in Anordnung einer Wheatstone'schen Halbbrücke. Die mechanische Verbiegung der Piezo- Kristalle bewirkt eine Spannungsänderung, die ein Kompensationsschreiber aufzeichnet.

Zur Verstärkung der Signale und als Spannungsgeber für den Kraftfühler dient ein Trägerfreqzenzmeßverstärker.
Durch Anlegen der Trägerfrequenzspannung an die Brücke werden die Widerstandsänderungen der Halbleiterelemente in elektrische Spannungsänderungen transformiert, die einem Mehrkanalschreiber der Fa. Watanabe zugeführt werden.
Der Kraftaufnehmer wird von einer 5 kHz-Trägerfrequenzspannung aus dem Meßverstärker MG 3170 der Fa. Hottinger-Baldwin-Meßtechnik (HBM) gespeist.
Die durch die mechanische Größe bedingte Brückenverstimmung wird über die Brückendiagonale elektrisch gemessen.

Das Ausgangssignal des Meßverstärkers ist der Brückenverstimmung proportional.
Die obere Grenze des linearen Meßbereichs dieser Anordnung beträgt ± 120 mN, die Maximalbelastung liegt unwesentlich höher.
Der Linearitätsfehler beträgt ± 1% vom Vollausschlag am Schreiber, entsprechend ± 0,1 mN.
Will der Proband eine Schwellenempfindung angeben, so betätigt er einen Taster. Dadurch wird die dem Meßverstärker nachgeschaltete Tarierautomatik TA 3545 der Fa. HBM ausgelöst, die die Brückenverstimmung abbricht und gegen Null führt. Damit erscheint auf dem Schreiber eine senkrechte Linie, die den Meßwert angibt.
Für Messungen direkt am menschlichen Körper sowie in Körperhöhlen werden nach VDE - Vorschrift 0750 erhebliche Sicherheitsvorkehrungen verlangt. Daher ist dem Kraftaufnehmer das Vorschaltgerät VG 750 der Fa. HBM vorgeschaltet, das die effektive Spannung an der Versuchsperson mittels zweier Trenntransformatoren auf maximal 6 V_{eff} begrenzt.
Die gesamte Versuchsanordnung zeigt das Blockschaltbild (Abb. 4)

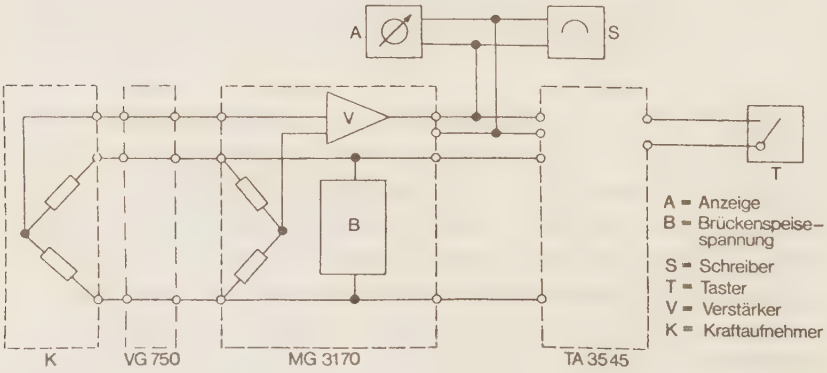


Abb. 4: Blockschaltbild der Versuchsanordnung.
Der Kraftaufnehmer ist über das Vorschaltgerät VG 750 mit dem Trägerfrequenzmeßverstärker MG 3170 und der Tarierautomatik TA 3545 mit dem Digitalvoltmeter A und dem Schreiber S verbunden.

2.1.3. Fehlerbetrachtung der elektrischen Meßanordnung

Da nicht festzustellen ist, in welchem Ausmaß die Fehler der einzelnen hintereinandergeschalteten Teile sich zu einem Gesamtfehler zusammensetzen, ist der ungünstigste Fall anzunehmen. Hierbei addieren sich die einzelnen Linearitätsfehler voll zum Gesamtfehler.
Zu betrachten sind der Linearitätsfehler der Halbbrücke (F_1), der des Meßverstärkers (F_2) und der des Schreibers (F_3).
Damit ist der Gesamtfehler $F_{ges} = F_1 + F_2 + F_3$.
Die Datenbeschreibungen der Geräte liefern folgende Werte:
F_{ges} = ($\pm$ 1%) + ($\pm$ 0,15%) + ($\pm$ 0,3%) des Vollausschlags.
$F_{ges} = \pm$ 1,5% des Vollausschlags.
Der Kalibrierfehler braucht nicht berücksichtigt zu werden, da vor jeder Messung der elektrische Teil der Versuchsanordnung geeicht wurde (JENZ 1976).

2.2. Versuchsablauf

Der Proband wird auf einem zahnärztlichen Behandlungsstuhl mit steil eingestellter Rückenlehne und Kopfstütze plaziert. Er soll aufrecht sitzen, sein Kopf muß an der Stütze fixiert sein, um eine axiale, erschütterungsfreie Kraftapplikation zu ermöglichen.
Außerdem wird die Versuchsperson darauf hingewiesen, während der Messung gleichmäßig und durch die Nase zu atmen, da vorbeistreichende Atemluft die Meßgenauigkeit des Fühlers beeinträchtigen würde.
Jede Ablenkung durch Geräusche u.ä. muß vermieden werden, da vom Probanden ein Höchstmaß an Konzentration verlangt wird.
Nach einer genaueren Aufklärung über den Versuchsablauf wird der Kraftfühler bei leicht geöffnetem Mund mittels des

Stativtriebes möglichst erschütterungsfrei auf die Incisalkante des betreffenden oberen Schneidezahnes aufgesetzt. Sodann startet der Versuchsleiter den Getriebemotor. Auf dem Schreiber kann er die kontinuierliche Kraftzunahme verfolgen.
Bei Erreichen des Schwellenwertes betätigt der Proband einen Taster, was vom Schreiber registriert wird.
Anschließend wird der Zahn entlastet, so daß der Schreiber wieder auf Null zurückgeht.

Durch Knopfdruck wird jetzt die elektrische Meßanordnung kalibriert. Nach kurzer Pause wird der Fühler dann erneut aufgesetzt und nochmals gemessen. In der Regel wurden die Messungen pro Zahn zehnmal wiederholt.

Nach neueren Untersuchungen von MÜHLBRADT (1976) und JENZ (1976) handelt es sich bei der Berührschwelle nicht um eine exakt definierte Größe, sondern eher um ein sensorisches Intervall. Auch unsere Probanden berichteten von zunächst sehr schwachen, unspezifischen Empfindungen; erst bei höheren Belastungen trat ein eindeutiges Druckgefühl auf.
Ab Proband 7 wurden daher bei jedem Meßvorgang beide Empfindungsstufen als Schwelle 1 und Schwelle 2 registriert, d.h. der Proband betätigte den Taster beim Auftreten der ersten, unspezifischen Empfindung und dann, nach weiterem Druckanstieg ein zweites Mal. Erst danach wurde der Zahn entlastet.
Nach zwei bis drei Leerversuchen ergaben sich zumeist hinlänglich gleichmäßige Meßreihen.
Es wurden nur obere, mittlere und seitliche Schneidezähne gemessen, und zwar jeweils ein Zahn, der mit einer Wurzelspitzenamputation versorgt werden sollte, sowie ein nicht zu behandelnder Vergleichszahn, der nach Möglichkeit symmetrisch zum ersten im Nachbarquadranten lag. Bei allen Wurzelspitzenamputationen wurde eine orthograde Zement-Silberstiftfüllung intra operationem nach der Methode von REHRMANN oder ACKERMANN durchgeführt.

An jedem Probanden (mit einer Ausnahme) wurde zu drei Untersuchungszeitpunkten (U) gemessen:

U_1 - Direkt vor der Wurzelspitzenamputation (WA).

U_2 - Zumeist eine Woche nach der WA.

U_3 - Ein viertel Jahr (zumeist) bis 5 Monate nach der WA.

Der Vergleichszahn wurde aus Zeitmangel in einigen Fällen nur zu zwei der angegebenen Zeitpunkte gemessen.

3. AUSWERTUNG DER MESSDATEN

3.1. Auszählung der Meßwerte

Abbildung 5 zeigt einen Ausschnitt aus einer typischen Meßkurve. Die den Verlust des Kraftanstiegs unterbrechenden senkrechten Linien geben die Meßwerte an.

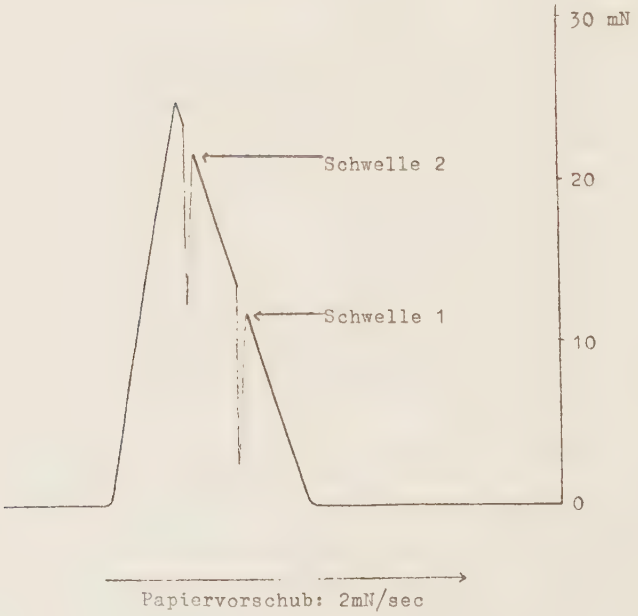


Abb. 5: Ausschnitt aus einer typischen Meßkurve: Das erste Signal (Schwelle 1) zeigt den Beginn der ersten, unspezifischen Berührempfindung, das zweite Signal (Schwelle 2) gibt das erste Auftreten eines klaren Druckgefühls an.

Grob fehlerhafte Messungen (Abrutschen des Fühlers, Vergessen des Signals u.ä.) wurden schon während des Versuchs markiert und ausgeschlossen.
Da zur Eichung des Fühlers ein 3 g-Gewicht benutzt wurde, erfolgte die Auszählung auch in g mit zwei Stellen hinter dem Komma, später wurde auf eine Stelle hinter dem Komma in mNewton umgerechnet.

3.2. Graphische Darstellung

Die errechneten arithmetischen Mittelwerte der einzelnen Meßreihen lassen sich als Stabdiagramme darstellen (vgl. Abb. 7 , S. 32 ff.)
An jedem Stab ist an der Verjüngungsstelle der Wert für die Schwelle 1 abzulesen, an seiner Spitze der für die Schwelle 2. Die Stäbe für die drei Untersuchungspunkte stehen in chronologischer Reihenfolge nebeneinander.
Die Stäbe für den Vergleichszahn wurden jeweils schraffiert. Diejenigen Schwellenmittelwerte eines Zahnes, die sich statistisch nicht voneinander unterscheiden, wurden durch einen Querstrich verbunden. Das Signifikanzniveau wurde mit 5% Irrtumswahrscheinlichkeit angesetzt.

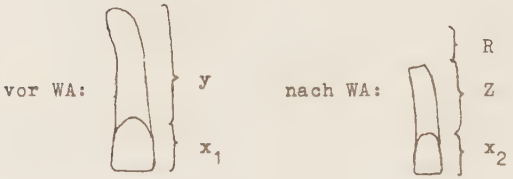
Außerdem wurden Schaubilder über empirische Verteilungen der Schwellenmittelwerte aller WA-Zähne sowie aller vitaler Vergleichszähne erstellt.
Dabei werden Schwelle 1 und Schwelle 2 jeweils gesondert zu den drei Untersuchungszeitpunkten betrachtet (s. Abb. 8 , S. 46 f)

3.3. Bestimmung der Wurzelverkürzung aus dem Röntgenbild

Zur Bestimmung der durch die Wurzelspitzenamputation bedingten prozentualen Wurzelverkürzung lagen bei allen WA-

Zähnen (außer bei Proband 04) Röntgenbilder (Mundfilme zu Zeitpunkten vor und nach der WA) vor.
Da die Röntgenbilder von verschiedenen Hilfspersonen und ohne Filmhalter belichtet wurden, kam es zu projektorischen Ungenauigkeiten, die in Abbildung 6 durch den Größenunterschied angedeutet sind.

Abb. 6: Schema der Röntgenaufnahmen vor und nach der Wurzelspitzenamputation.



x_1 - röntgenologische Kronenlänge vor WA
x_2 - röntgenologische Kronenlänge nach WA
y - röntgenologische Wurzellänge vor WA
Z - röntgenologische Wurzellänge nach Verkürzung
R - entsprechende Länge des amputierten Wurzelstücks

Der Absolutwert der Länge der amputierten Wurzelspitze ist aus den Röntgenbildern nicht zu ermitteln, wohl aber der prozentuale Längenverlust bezogen auf die Gesamtwurzel-

länge entsprechend 100%.
Dazu wurde die Tatsache herangezogen, daß die Kronenlänge im Verlauf der Behandlung unbeeinflußt blieb, der Unterschied von x_1 gegenüber x_2 ist also allein durch die Projektionsunterschiede zwischen beiden Aufnahmen bedingt.

So ergibt sich das Verhältnis $\frac{y}{x_1} = \frac{R + Z}{x_2}$

und daraus $R = \frac{y \cdot x_2}{x_1} - Z$

R gibt die röntgenologische Länge des entfernten Wurzelteiles in mm bezogen auf das Röntgenbild nach der WA an, nicht die Länge in natura.
Daher war es sinnvoller, den prozentualen Verlust an Wurzellänge zu bestimmen:

Prozentualer Verlust an Wurzellänge $= \frac{R}{Z + R} \cdot 100\% =$

$$\frac{y \cdot x_2 - Z \cdot x_1}{y \cdot x_2} \cdot 100\%$$

Hier muß noch auf die Schwierigkeit eingegangen werden, an dem Röntgenbild eines wurzelspitzenamputierten Zahnes die Amputationsstelle genau zu bestimmen. Bedingt durch die Operationstechnik ist nämlich die Amputationsfläche bei oberen Frontzähnen nach labial unten geneigt, so daß die Restwurzel palatinal länger ist als labial. Daher erscheint die in Wirklichkeit glatt an der Amputationsfläche abschließende Wurzelfüllung (Silberstift) auf dem Röntgenbild etwas unterhalb der neuen Wurzelspitze.
Zur Bestimmung eines Mittelwertes für die palatinal und labial verschieden langen Ausdehnungen der Restwurzel wurde der apikale Endpunkt der Wurzelfüllung herangezogen.

3.4. Statistische Auswertung

Zunächst war es nötig, aus jeder einzelnen Meßreihe einen arithmetischen Mittelwert zu bestimmen.
Die Genauigkeit des Mittelwertes erhöht sich naturgemäß mit der Anzahl der registrierten Einzelwerte.
Ein Maß für die Größe der Abweichung vom wahren Mittelwert ist die Varianz oder Streuung s^2 (bzw. die Standardabweichung s).
Dies ist die Summe der Abweichungsquadrate dividiert durch die Anzahl der Freiheitsgrade.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2$$

Tabelle 1 (s.S. 72) gibt die Einzelwerte, die Mittelwerte für jede Meßreihe, die Standardabweichung (jeweils in mNewton), sowie den prozentualen Verlust an Wurzellänge (in %) an.
Es kamen verschiedene statistische Methoden zur Anwendung:

a) Zur Prüfung der Gleichheit oder Ungleichheit von mehr als zwei Varianzen zunächst eine Varianzanalyse nach Bartlett. Um herauszufinden, welche zwei Mittelwerte sich jeweils unterscheiden, wurde dann eine Beurteilung linearer Kontraste nach Scheffé vorgenommen.
Hiermit konnten Signifikanzen mit 5%-iger wie auch mit 1%-iger Irrtumswahrscheinlichkeit festgestellt werden.
Dieses Verfahren wurde bei den Vergleichen der Schwellenmittelwerte eines Zahnes zu drei Untersuchungszeitpunkten vor und nach der WA angewandt (Tabellen 4 und 5, s. S. 100 ff)

b) Zum Vergleich von nur zwei Varianzen wurde der t-Test durchgeführt, wenn die Varianzen homogen waren.

(Prüfung auf Homogenität zuvor mit dem sog. F-Test.)

Die Prüfgröße t ist: $$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{n_1+n_2}{n_1 \cdot n_2} \times \frac{Q_1+Q_2}{n_1+n_2-2}}}$$

n_1, n_2 Anzahl der Stichprobenwerte

x_1, x_2 Mittelwerte der Stichproben

$Q = (x-\bar{x})^2$ Summe der Abweichungsquadrate

Bei Inhomogenität der zu vergleichenden Varianzen kam der sog. Aspin-Welch-Test zur Anwendung mit der Prüfgröße:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}$$

s_1, s_2 Standardabweichungen

Diese Verfahren wurden verwandt für die Tabellen 3, 6, 7, 8.

c) Zur Überprüfung eines etwaigen Zusammenhangs zwischen der prozentualen Änderung der Schwellenmittelwerte zwischen den drei Untersuchungszeitpunkten U_1, U_2 und U_3 (bezogen auf den jeweiligen Mittelwert zum Zeitpunkt U_1 entsprechend 100%) und dem prozentualen Verlust der Wurzellänge wurden Korrelation und Regression getestet (Tabelle 9, S.109f).
Die Korrelationsanalyse untersucht stochastische Zusammenhänge (i.e. lose Verkettungen) zwischen gleichwertigen Zufallsvariablen anhand einer Stichprobe.
Für den Korrelationskoeffizienten gilt: $-1 \leq \varrho \leq +1$
Ist $\varrho = 0$, so sind die Variablen unkorreliert.
Ist $\varrho = 1$, so besteht ein funktioneller Zusammenhang in Form einer Geraden.

Bei $\varrho \geq 0{,}5$ läßt sich eine Aussage über eine zu erwartende Abhängigkeit machen.
Der Regressionskoeffizient c_1 gibt die Steigung der Regressionsgeraden $y = c_o + c_1 \times X$ an.
Ist er Null, so besteht Unabhängigkeit der Variablen.

d) Zur Erstellung von Häufigkeitsverteilungen (Histogramme) der Schwellenmittelwerte von Zähnen verschiedener Probanden wurden die herangezogenen Schwellenmittelwerte auf volle mNewton gerundet und in Klassen bestimmter Häufigkeit unterteilt.
Die Klassenanzahl wurde nach der Faustregel von Sturges festgelegt:

$$K = 1 + 3{,}32 \lg N$$

K	Anzahl der Klassen
N	Anzahl der Werte

K wurde auf eine ganze Zahl auf- bzw. abgerundet: Es ergaben sich mit einer Ausnahme je 5 Klassen.
(Statistische Verfahren nach SACHS 1972)

Die statistische Auswertung des Datenmaterials erfolgte im Zentrum für Datenverarbeitung der Universität Tübingen auf der Rechenanlage TR 440 von Telefunken.

An dieser Stelle möchte ich den Herren Schubring und Schill für ihre freundliche Unterstützung danken.

4. UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

4.1. Taktile Schwellen oberer mittlerer und seitlicher Schneidezähne

An 21 Probanden im Alter zwischen 13 Jahren, 10 Monaten und 36 Jahren, 5 Monaten, wurden die taktilen Schwellen an oberen 1ern bzw. 2ern zu drei verschiedenen Untersuchungszeitpunkten gemessen wie im Abschnitt 2.2 - Versuchsablauf (s.S. 21) beschrieben. Das mittlere Alter betrug 22 Jahre, 9 Monate.
Die Zähne wurden auf marginale Prozesse wie Zahnfleischtaschenbildung, Retraktion der Gingiva und verstärkte Lockerung geprüft:
Lediglich bei den Probanden Nr. 02 und 14 bestanden leicht vertiefte Zahnfleischtaschen zwischen 3 und 4 mm und röntgenologisch nachweisbarer Seitenabbau im distalen Interdentalraum.
Bei allen übrigen Probanden war das marginale Parodontium klinisch gesund.
Bei jedem Probanden wurde ein Zahn gemessen, der nach der ersten Messung mit einer Wurzelspitzenamputation und einer Silberstift-Zement-Wurzelfüllung versorgt wurde ("WA-Zahn"), sowie ein nicht zu behandelnder Vergleichszahn, der in den meisten Fällen eine vitale Reaktion zeigte. (Bei den Probanden Nr. 11, 15, 16 wurden je zwei WA-Zähne untersucht; bei den Probanden Nr. 6 und 15 je zwei Vergleichszähne; bei Proband Nr. 16 konnte nur zu den ersten beiden Untersuchungszeitpunkten gemessen werden.)
Tabelle 1 (S. 72) gibt die einzelnen Meßwerte wieder, außerdem für jede Meßreihe die Anzahl der Einzelwerte, den arithmetischen Mittelwert, die Standardabweichung, sowie bei WA-Zähnen den prozentualen Verlust an Wurzellänge nach der Wurzelspitzenamputation. Die Meßwerte sind in mNewton angegeben (1 mN = 0,102 p).
In den Abbildungen 7a bis 7v sind die Ergebnisse eines jeden Probanden graphisch dargestellt.

Abb. 7: Darstellung von Mittelwerten taktiler Schwellen (aus jeweils ca. 10 Einzelwerten) in Form von Stabdiagrammen (für jeden gemessenen Zahn jedes Probanden zu den verschiedenen Untersuchungszeitpunkten).
Ordinate: Schwellenhöhe in mNewton.
Unter den Stäben: U_1, U_2 oder U_3 - jeweiliger Untersuchungszeitpunkt:
U_1: vor der WA
U_2: ca. 1 Woche nach der WA
U_3: ca. 1/4 Jahr nach der WA.
Probanden-Nr., Zahnziffer.
Dicker Teil eines Stabes: Schwelle 1
Dünner Teil eines Stabes: Schwelle 2 (erst ab Proband 08 zu allen drei Zeitpunkten bestimmt.
Nicht schraffierte Stäbe: WA- Zahn (wird nach U_1 wurzelspitzenamputiert)
Schraffierte Stäbe: nicht zu behandelnde Vergleichszähne (zumeist vital).
Diejenigen sich entsprechenden Schwellenmittelwerte eines Zahnes, die sich statistisch nicht signifikant voneinander unterscheiden, wurden durch einen Querstrich verbunden.
Das Signifikanzniveau wurde mit 5% Irrtumswahrscheinlichkeit angesetzt.

Beispiel:

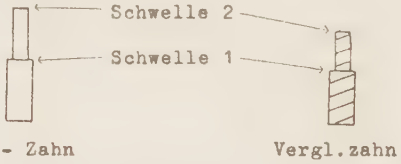


Abb. 7 a)

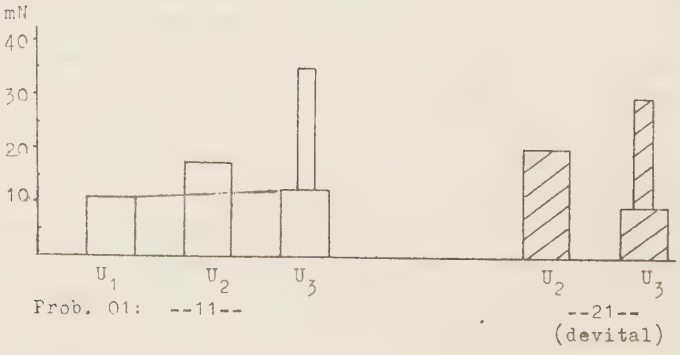


Abb. 7 b)

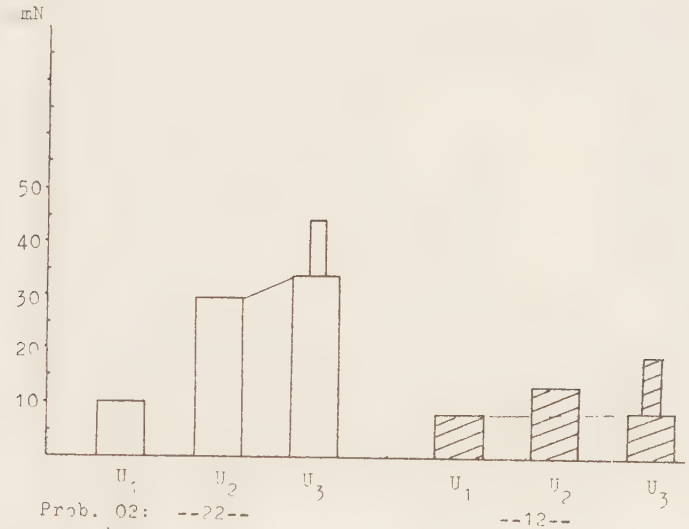

mN
50
40
30
20
10
U1
U2
U3
U1
U2
U3
Prob. 02: --22--
--12--

Abb. 7 c)

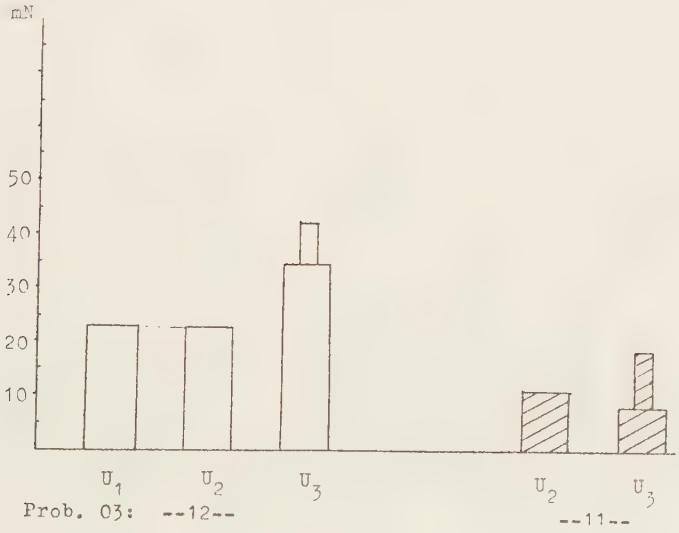

mN
50
40
30
20
10
U1
U2
U3
U2
U3
Prob. 03: --12--
--11--

Abb. 7 d)

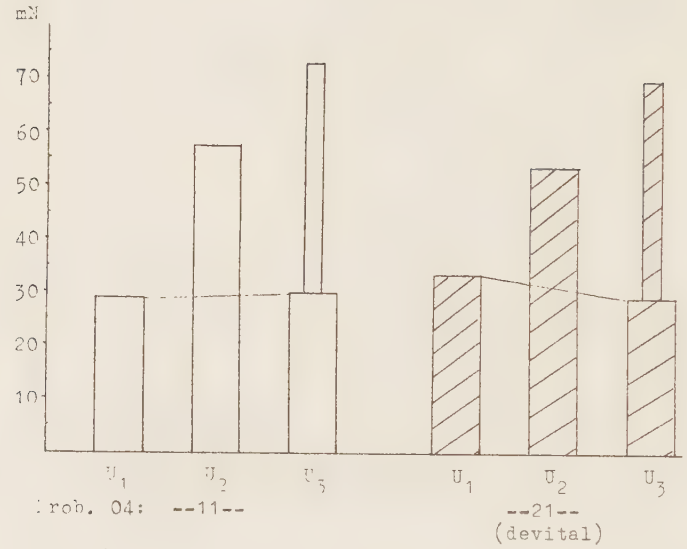

mN
70
60
50
40
30
20
10
U1
U2
U3
U1
U2
U3
Prob. 04: --11--
--21--
(devital)

Abb. 7 e)

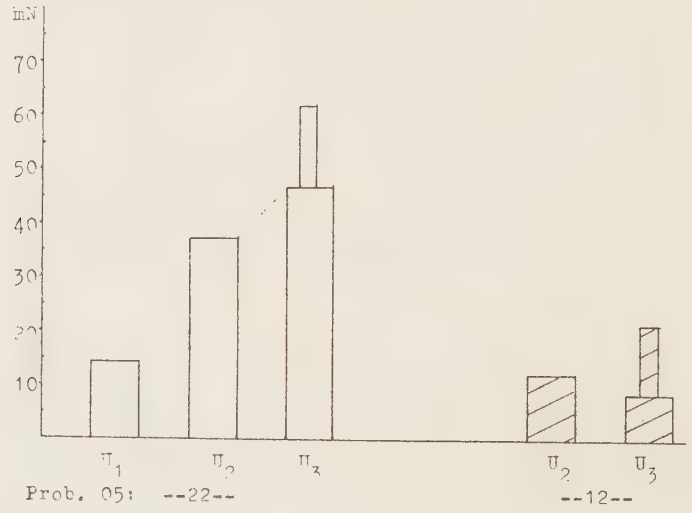

mN
70
60
50
40
30
10
U1
U2
U3
U2
U3
Prob. 05: --22--
--12--

Abb. 7 f)

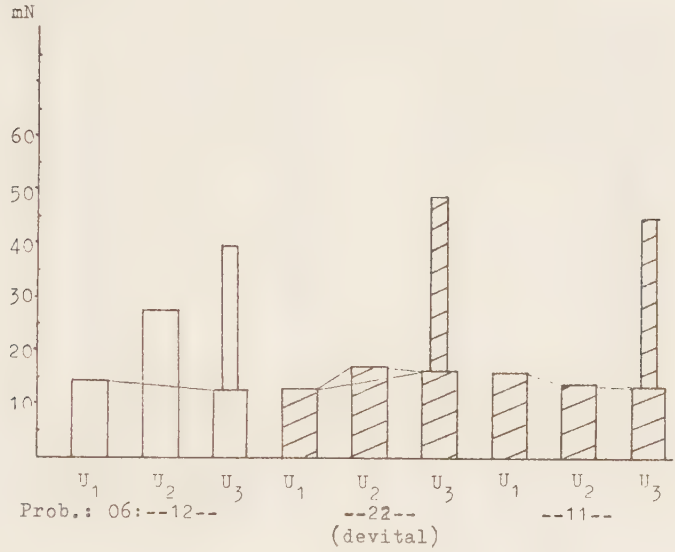

mN
60
50
40
30
20
10
U1 U2 U3 U1 U2 U3 U1 U2 U3
Prob.: 06: --12-- --22-- --11--
(devital)

Abb. 7 g)

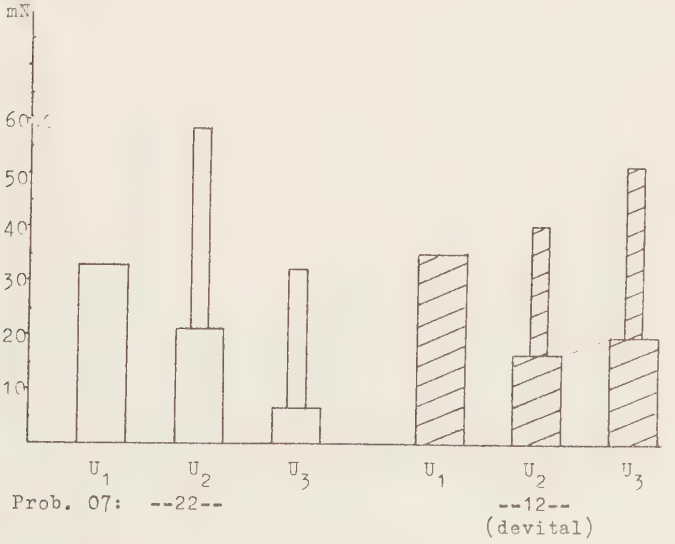

mN
60
50
40
30
20
10
U1 U2 U3 U1 U2 U3
Prob. 07: --22-- --12--
(devital)

Abb. 7 h)

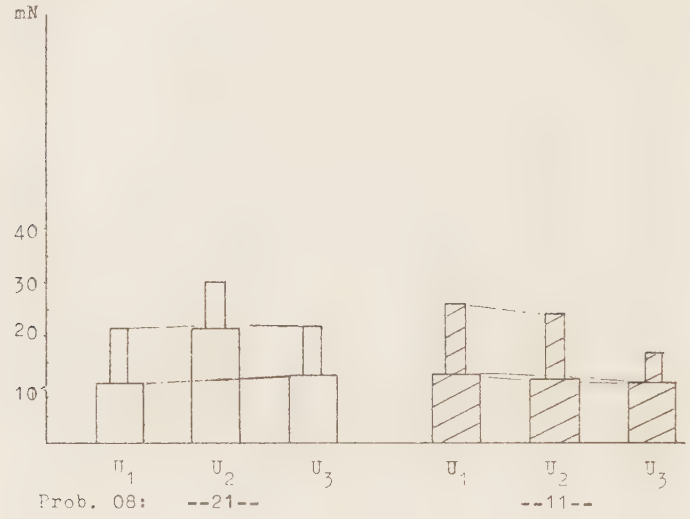

mN
40
30
20
10
U_1
U_2
U_3
U_1
U_2
U_3
Prob. 08: --21--
--11--

Abb. 7 i)

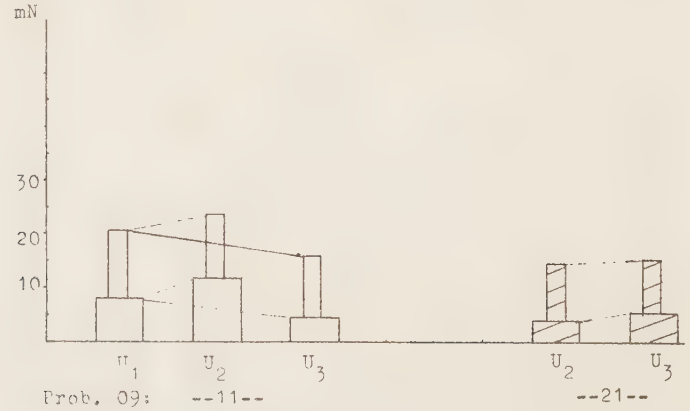
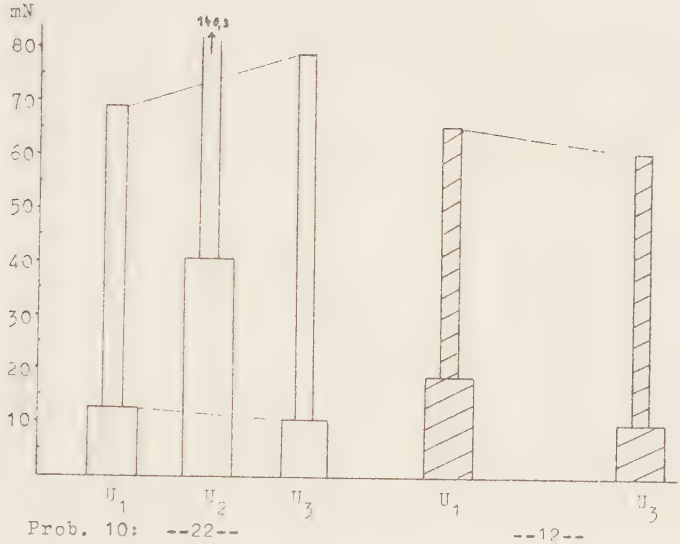
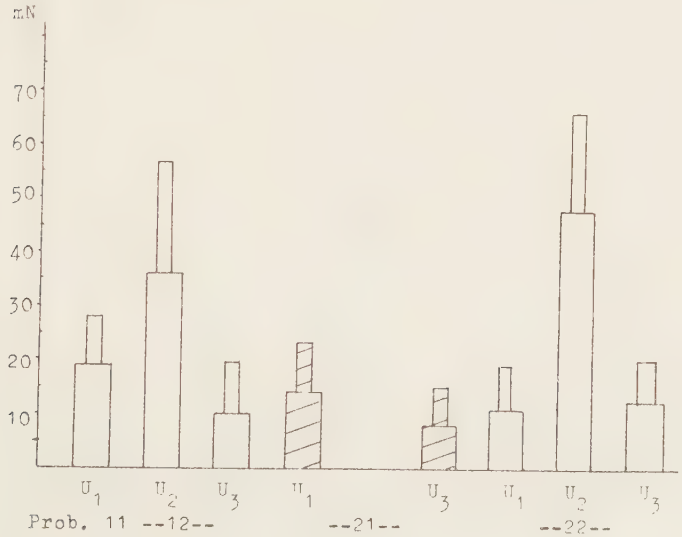

mN
30
20
10
U_1
U_2
U_3
U_2
U_3
Prob. 09: --11--
--21--

Abb. 7 j)



Prob. 10: --22-- --12--

Abb. 7 k)



Prob. 11 --12-- --21-- --22--

Abb. 7 l)

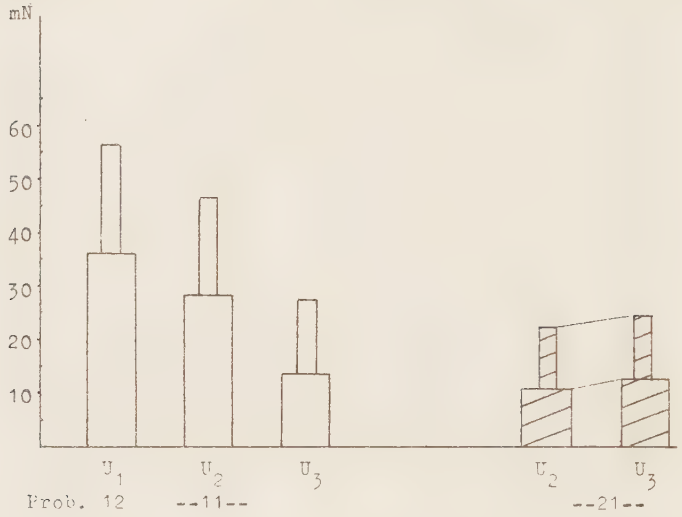

mN
60
50
40
30
20
10
U1
U2
U3
U2
U3
Prob. 12
--11--
--21--

Abb. 7 m)

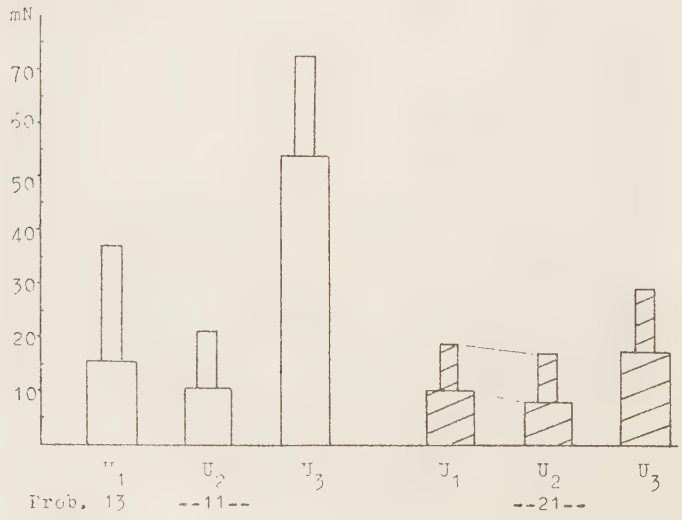
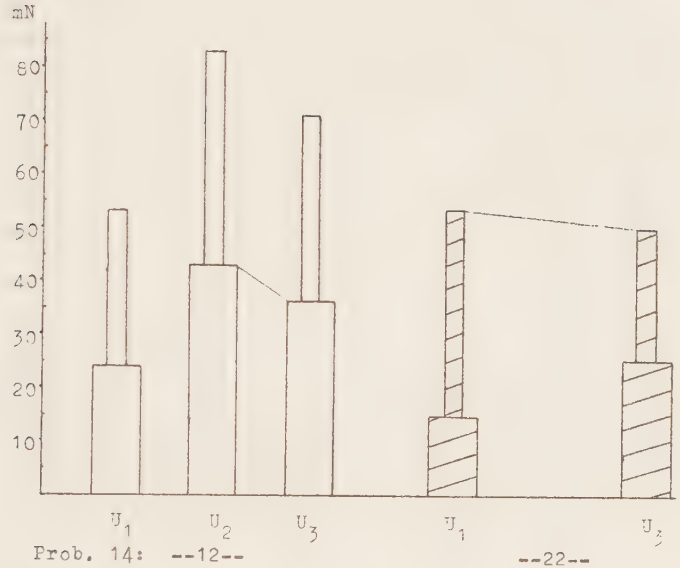
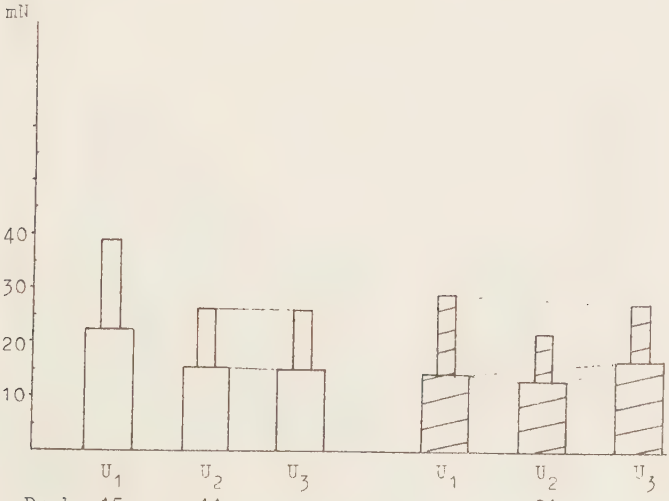

mN
70
60
50
40
30
20
10
U1
U2
U3
U1
U2
U3
Prob. 13
--11--
--21--

Abb. 7 n)



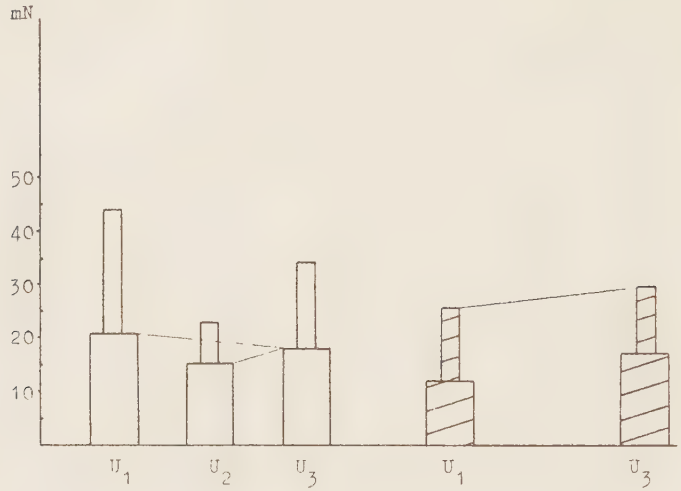
Prob. 14: --12-- --22--

Abb. 7 o)



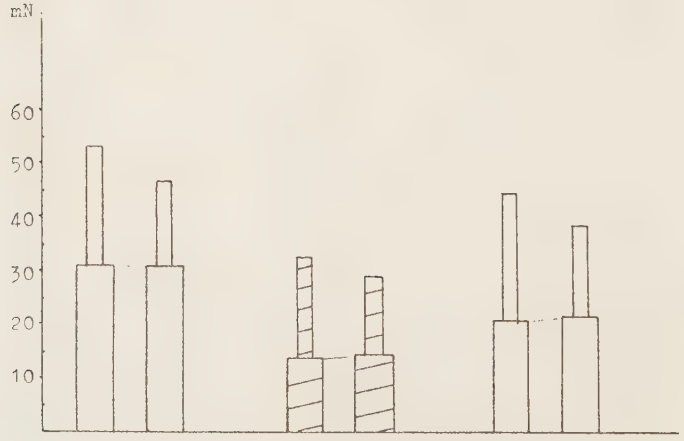
Prob. 15: --11-- --21--

Abb. 7 p)



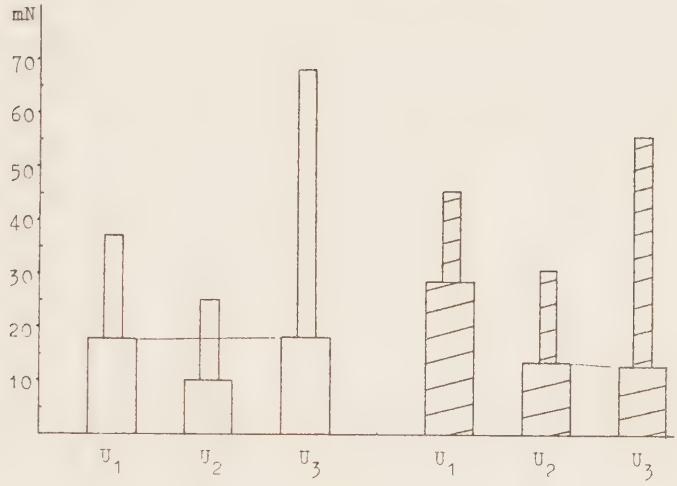
Prob. 15: --22-- --12--

Abb. 7 q)



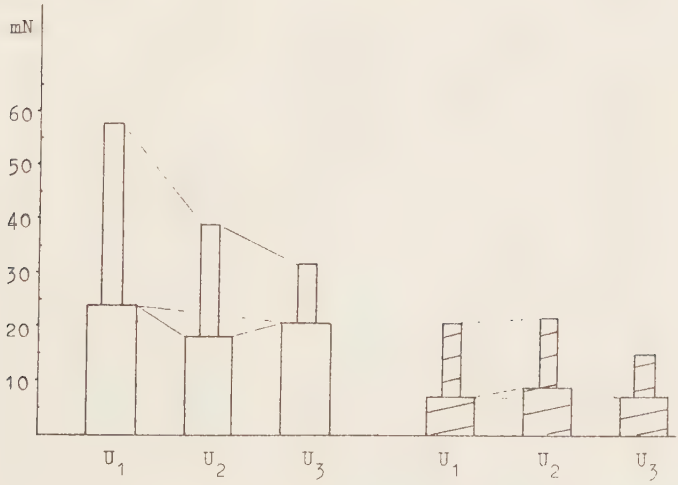
Prob. 16: -11- --21-- --12--

Abb. 7 r)



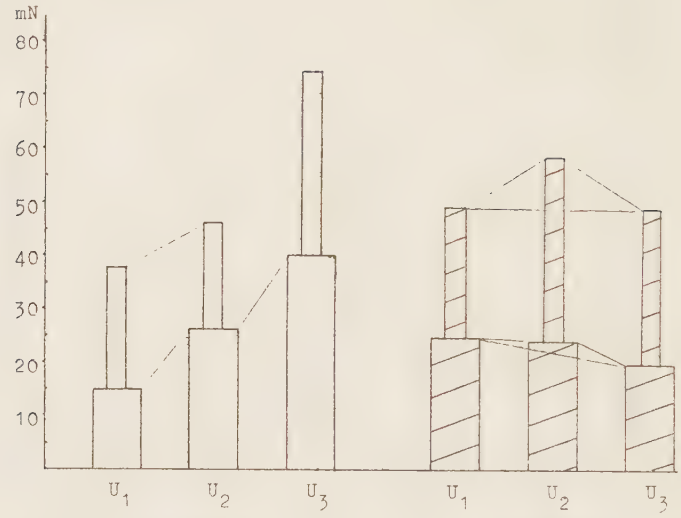
Prob. 17: --11-- --21--

Abb. 7 s)



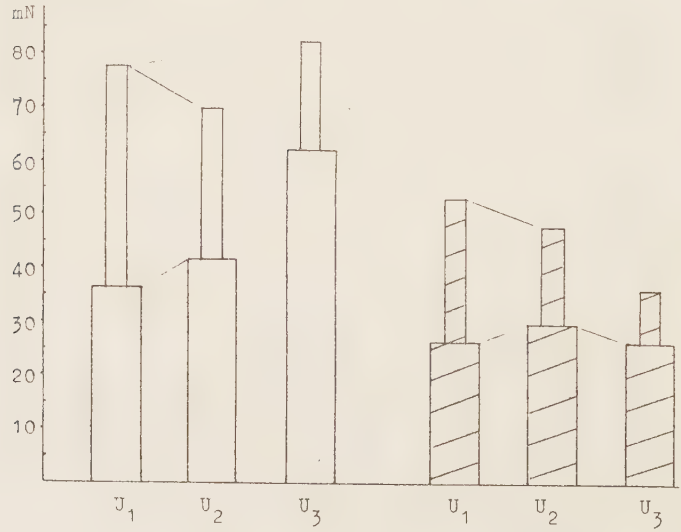
Prob. 18: --12-- --22--

Abb. 7 t)



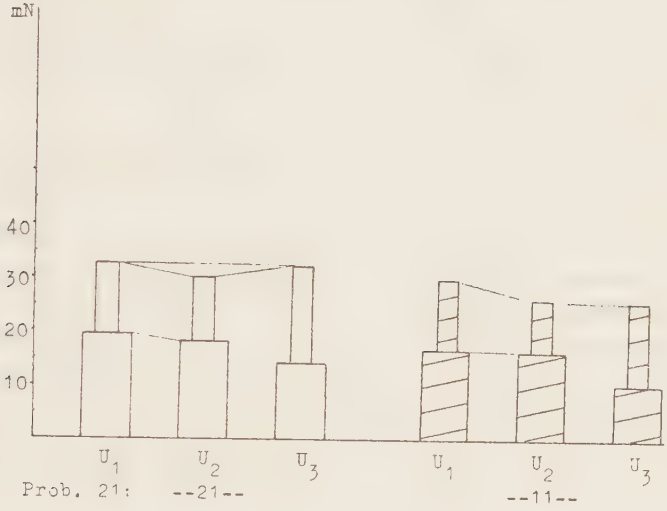
Prob. 19: --22-- --12--

Abb. 7 u)



Prob. 20: --11-- --12--

Abb. 7 v)



Die an verschiedenen Zähnen mit vitaler Pulpa bestimmten Schwellenmittelwerte liegen je nach Proband und Untersuchungszeitpunkt:

bei oberen 1ern für Schwelle 1: zwischen 4,10 u. 28,85 mN,
für Schwelle 2: zwischen 15,58 u. 56,31 mN,

bei oberen 2ern für Schwelle 1: zwischen 8,15 u. 29,53 mN,
für Schwelle 2: zwischen 15,59 u. 66,33 mN.

Hieraus wird ersichtlich, wie problematisch der Versuch ist, einen repräsentativen Schwellenwert bezogen auf einen Zahntyp anzugeben. JENZ (1976) teilt unsere Skepsis, während andere Autoren solche Werte angaben (TÜRCKHEIM 1920, MÜNCH und SCHRIEVER 1931, ADLER 1947, GNEUPEL 1951, LÖWENSTEIN und RATHKAMP 1955, WILKIE 1964 u.a.).
Unter Vorbehalt haben auch wir Gesamtmittelwerte der Schwellen bestimmt. Diese sind in Tabelle 2 (S.98) mit Angabe der Anzahl herangezogener Einzelmittelwerte wie auch der Standardabweichung für die Untersuchungszeitpunkte U_1, U_2 und U_3 zusammengestellt.
Zum Vergleich der Gesamtmittelwerte verschiedener Zahntypen (vitale 1er, vitale 2er, WA-1er, WA-2er) wurde der t-Test, bzw. der Aspin-Welch-Test durchgeführt.
Das Ergebnis zeigt Tabelle 3 (S.99):
Beim Vergleich der Gesamtheiten der Schwellenmittelwerte von vitalen 1ern und 2ern liegt nur zum Zeitpunkt U_1 (vor der WA) bei Schwelle 2 ein signifikanter Unterschied vor. Beim entsprechenden Vergleich von WA-1ern und -2ern liegt lediglich zum Zeitpunkt U_2 (eine Woche nach der WA) ein signifikanter Unterschied vor.
Man muß im ganzen zu dem Ergebnis kommen, daß die entsprechenden Schwellenwerte von oberen 1ern und 2ern sich praktisch nicht signifikant voneinander unterscheiden (s. auch JENZ 1976).

Daher wurden die Gesamtmittelwerte von vitalen 1ern und 2ern einerseits und WA-1ern und -2ern andererseits in Tabelle 2 (s.S.98) zusammengefaßt.

Für vitale obere 1er und 2er liegt der Gesamt-Schwellenmittelwert der Schwelle 1 je nach Untersuchungszeitpunkt zwischen 16,14 mN (Zeitpunkt U_3) und 17,68 mN (Zeitpunkt U_1), der der Schwelle 2 zwischen 31,20 mN (Zeitpunkt U_2) und 36,90 mN (Zeitpunkt U_1).

Abbildung 8 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Schwellenmittelwerte aller WA-Zähne (1er und 2er zusammen) und aller vitaler Vergleichszähne (1er und 2er zusammen).
Schwelle 1 und Schwelle 2 werden zu jedem der drei Untersuchungszeitpunkte gesondert betrachtet.
Die Klassengrenzen (in mN) sind in jedem Diagramm an der Abszisse angegeben, die Ordinate zeigt jeweils, wieviele Schwellenmittelwerte sich in einer Klasse befinden (Häufigkeit), N gibt die Anzahl der für jedes Histogramm herangezogenen Schwellenmittelwerte an.

Abb. 8: Häufigkeitsverteilungen der Schwellenmittelwerte der WA- Zähne, sowie der vitalen Vergleichszähne (jeweils getrennt für Schwelle 1 und Schwelle 2 zu den drei Untersuchungszeitpunkten U_1, U_2 und U_3).
Abszisse: Klassengrenzen der Schwellenmittelwerte in mNewton.
Ordinate: Häufigkeit (= Anzahl der Schwellenmittelwerte in einer Klasse).
N : für das jeweilige Diagramm herangezogene Anzahl der Schwellenmittelwerte.

Die Diagramme zeigen zumindest für Schwelle 1 eine Ähnlichkeit mit Normalverteilungen.

Abb. 8 a) WA- Zähne: Schwelle 1

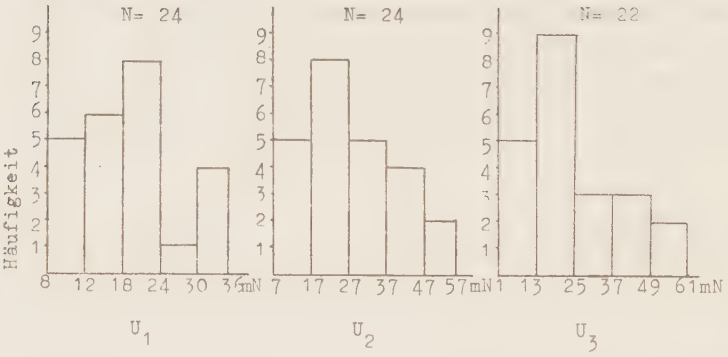


Abb. 8 b) WA- Zähne: Schwelle 2

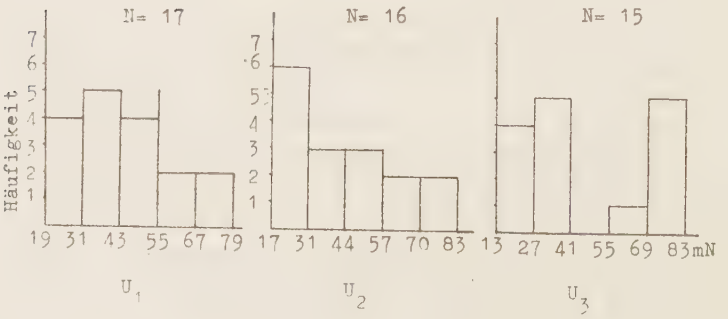


Abb. 8 c) Zähne mit vitaler Pulpa: Schwelle 1

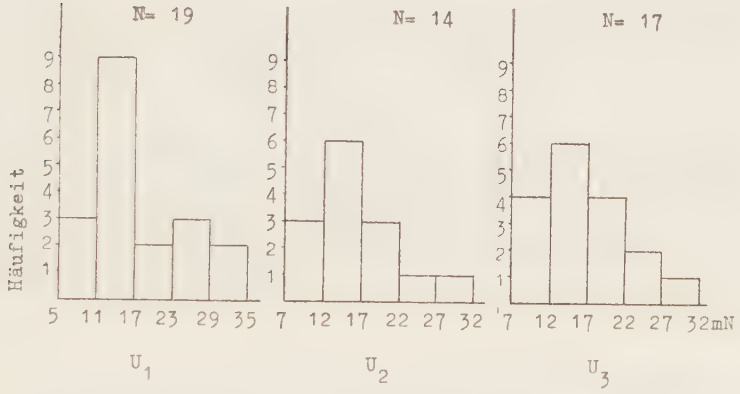
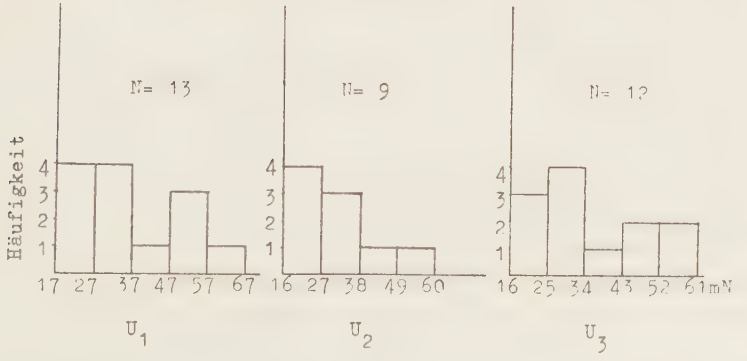


Abb. 8 d) Zähne mit vitaler Pulpa: Schwelle 2



Es fällt auf, daß nicht alle Histogramme eine Ähnlichkeit mit einer Normalverteilung erkennen lassen (Glockenkurve). Besonders bei der Schwelle 2 finden wir oft unregelmäßige Verteilungen.
Zumindest die Verteilungen bei der Schwelle 1 ähneln sowohl bei den vitalen wie auch bei den WA-Zähnen Normalverteilungen. Bei den vitalen Zähnen findet sich für die Schwelle 1 zu allen drei Untersuchungszeitpunkten übereinstimmend ein Häufigkeitsmaximum zwischen 11 und 17 mN bzw. 12 und 17 mN. In diesem Bereich liegen zum Zeitpunkt U_1 9 von 19 Werten (47,4%), zum Zeitpunkt U_2 6 von 14 Werten (42,2%), zum Zeitpunkt U_3 6 von 17 Werten (35,3%).
Sinnvoller als einen Gesamtmittelwert anzugeben, ist daher folgende Aussage: Bei vitalen oberen 1ern und 2ern findet man bei 47,4% (U_1 - vor der WA), bzw. bei 42,9% (U_2 - eine Woche nach der WA), bzw. bei 35,3% (U_3 - ca. 1/4 Jahr nach der WA) eine Berührschwelle (Schwelle 1) zwischen 11 und 17 mN.

4.2. Das sensorische Intervall: 1. und 2. Schwelle

Die beträchtliche Streuung der Einzelmeßwerte weist auf die große Unsicherheit der Probanden hin, die Berührschwelle reproduzierbar anzugeben.
Die Versuchspersonen berichteten von zunächst sehr unbestimmten, schwer beschreibbaren Empfindungen und erst bei höheren Belastungen von einem eindeutigen Druckgefühl.
Bei Beginn der unspezifischen Empfindungen wurde Schwelle 1 registriert, beim ersten Auftreten eines klaren Druckgefühls Schwelle 2 (s. JENZ 1976).
Wie oben erwähnt, zeigen die Histogramme in Abb. 8 deutliche Ähnlichkeiten mit Normalverteilungen nur für Schwelle 1. Ändern sich die beiden Schwellen für einen Zahn gleich oder gegensinnig unter dem Einfluß der Wurzelspitzenamputation? Vergleiche der relativen Schwellenbewegungen waren statistisch

nicht durchführbar; sie werden daher qualitativ beschreibend vorgenommen:
Tabelle 4 (s.S.100) gibt Veränderungen der Schwellen zwischen den Untersuchungszeitpunkten U_1 und U_2 einerseits und zwischen U_2 und U_3 andererseits qualitativ an. (siehe hierzu Abb.7,S.32)(Varianzanalysen nach Bartlett, Beurteilung linearer Kontraste nach Scheffé)
Werden für jeden Zahn die qualitativen Änderungen von Schwelle 1 mit denen von Schwelle 2 verglichen, so fällt auf, daß nur bei Proband 20 gegensinnige Bewegungen beider Schwellen vorliegen.
In allen anderen Fällen verhalten sich beide Schwellen entweder synchron -- beide steigen, beide bleiben auf Ausgangsniveau, beide fallen -- (in 38 Fällen) oder aber eine Schwele verbleibt auf ihrem Ausgangsniveau, während die andere sich ändert (in 13 Fällen).

4.3. Die taktilen Schwellen von apikal erkrankten und später mit Wurzelspitzenamputation versorgten "WA-Zähnen" sowie von nicht behandelten Vergleichszähnen zu drei Zeitpunkten vor und nach der WA

Die Stabdiagramme(Abb. 7) geben die Mittelwerte der Meßreihen für beide Schwellen zu jedem Untersuchungszeitpunkt wider.
Tabelle 5 (S.102) zeigt die Vergleiche der Schwellenmittelwerte zu den drei Zeitpunkten für die WA-Zähne und
für die Vergleichszähne.
(Varianzanalysen nach Bartlett, Beurteilung linearer Kontraste nach Scheffé)

4.3.1. Verhalten der taktilen Schwellen vor und nach der Wurzelspitzenamputation

Anhand der Stabdiagramme (Abb. 7), der Signifikanztabelle (Tab. 5, S.102) sowie der Tabelle über die qualitativen Schwellenänderungen (Tab. 4, S.100) läßt sich für die Ergebnisse vor und nach der WA folgende Zusammenfassung geben: (Beide Schwellen lassen sich meist gemeinsam besprechen!)

Von U_1 nach U_2 zeigen 11 Zähne einen signifikanten Anstieg der Schwellen nach der Wurzelspitzenamputation bei den Probanden: 01, 02, 04, 05, 06, 08, 09, 10, 11 (2 WA-Zähne), 14

7 Zähne zeigen dagegen von U_1 nach U_2 eine signifikante Erniedrigung der Schwellen, bei den Probanden: 07, 12, 13, 15, 16 (2 WA-Zähne, nur Schwelle 1), 17

Von U_1 nach U_2 zeigen 7 Zähne keine signifikanten Schwellenänderungen, bei den Probanden: 03, 16 (2 WA-Zähne, nur Schwelle 2), 18, 19, 20, 21

Von U_2 nach U_3 zeigen 6 Zähne einen signifikanten Anstieg der Schwellen, bei den Probanden: 03, 13, 15 (Schw. 2), 17, 19 (Schw. 2), 20 (Schw. 2)

Von U_2 nach U_3 zeigen 12 Zähne eine signifikante Erniedrigung der Schwellen, bei den Probanden: 01, 04, 06, 07, 08, 09, 10, 11 (2 Zähne), 12, 14 (Schw. 2), 21 (Schw. 2)

Von U_2 nach U_3 zeigen 7 Zähne keine signifikanten Schwellenänderungen, bei den Probanden: 02, 05, 14 (Schw. 1), 18, 19 (Schw. 1), 20 (Schw. 2), 21 (Schw. 2)

Von U_1 nach U_3 zeigen 8 Zähne einen signifikanten Anstieg der Schwellen, bei den Probanden: 02, 03, 05, 13, 14, 17 (Schw. 2), 19, 20 (Schw. 1)

Von U_1 nach U_3 zeigen 6 Zähne eine signifikante Erniedrigung der Schwellen, bei den Probanden: 07, 11, 12, 15 (2 Zähne), 21 (Schw. 1)

Von U_1 nach U_3 zeigen 10 Zähne keine signifikanten Schwellenänderungen, bei den Probanden: 01, 04, 06, 08, 09, 10, 17 (Schw. 1), 18, 20 (Schw. 2), 21 (Schw. 2)

Es zeichnet sich also keine einheitliche Tendenz ab; vielmehr sind nach der Wurzelspitzenamputation Veränderungen der Schwellen in jeder Richtung möglich.
Die Aufstellung zeigt aber, daß im ersten Intervall (von U_1 nach U_2) die Schwellen am häufigsten ansteigen (bei 11 Zähnen), daß im zweiten Intervall (von U_2 nach U_3) die Schwellen am häufigsten abfallen (bei 12 Zähnen), daß im Intervall von U_1 nach U_3die Schwellen am häufigsten keine signifikanten Änderungen zeigen (bei 10 Zähnen).

Eine solche Auf- und Abbewegung zeigt sich auch in Abbildung 7 (S.32f) bei 9 Zähnen, sowie bei den Gesamtschwellenmittelwerten der Tabelle 2 (S.98).

4.3.2. Vergleich der taktilen Schwellen marktoter Zähne vor der WA mit denen von Zähnen mit vitaler Pulpa

Die Schwellenmittelwerte der marktoten zum Zeitpunkt U_1 vor der WA wurden mit denen der entsprechenden vitalen Vergleichszähne verglichen.
Alle herangezogenen marktoten Zähne hatten eine apikale Erkrankung.
Die Tabelle 6 (S.106) zeigt die Vergleiche, die mit dem t-Test, bzw. mit dem Aspin-Welch-Test (bei Inhomogenität der Varianzen) durchgeführt wurden: Schwelle 1 liegt bei vitalen Vergleichszähnen signifikant tiefer bei den Probanden:

02, 03, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 20, 21 (10 von 18 Probanden)

Schwelle 2 liegt bei vitalen Vergleichszähnen signifikant tiefer bei den Probanden: 12, 13, 15, 16, 18, 20 (6 von 14 Probanden, bei denen Schwelle 2 schon zum Zeitpunkt U_1 bestimmt wurde)

Bei den übrigen Probanden zeigt sich keine Signifikanz, oder die Schwellen der vitalen Zähne liegen sogar höher als die der marktoten.
Vergleicht man die Schwellenwerte der marktoten Zähne (Zeitpunkt U_1: vor der WA) mit denen der entsprechenden vitalen Vergleichszähne zu anderen Untersuchungszeitpunkten (U_2 und U_3), so zeigt sich, daß nur die Schwellen der marktoten Zähne bei den Probanden 03, 16 (2 WA-Zähne), 18 und 20 signifikant über denen der vitalen Vergleichszähne liegen, gleichgültig, ob bei letzteren die Meßwerte von U_1, U_2, oder U_3 herangezogen wurden. Nur bei diesen 4 Probanden liegen die Schwellen des vitalen Vergleichszahns zu allen 3 Untersuchungszeitpunkten unter denen des marktoten Zahnes zum Zeitpunkt U_1.
Auch Tabelle 2 zeigt beim Vergleich der Gesamtheiten der Schwellen der WA- 1er und -2er einerseits und der vitalen 1er und 2er andererseits zum Zeitpunkt U_1 keine Signifikanz. Nach unseren Untersuchungen haben also vitale Zähne nicht grundsätzlich niedrigere taktile Schwellen (d.h. keine höhere taktile Sensibilität) als marktote Zähne.

4.3.3. Vergleich der taktilen Schwellen wurzelspitzenamputierter Zähne mit denen von Vergleichszähnen

In den Tabellen 7 und 8 (s.S.107) werden die Schwellen von WA-Zähnen und dem jeweiligen Vergleichszahn zu den beiden Untersuchungszeitpunkten nach der Wurzelspitzenamputation (U_2 und U_3) einander gegenübergestellt.

Wiederum wurde jeweils ein t-Test, bzw. (bei Inhomogenität der Varianzen) ein Aspin-Welch-Test durchgeführt.
Zum Zeitpunkt U_2 (Tabelle 7) war Schwelle 1 bei 13 WA-Zähnen signifikant höher als bei ihren Vergleichszähnen, einmal war sie signifikant niedriger, zweimal bestand kein signifikanter Unterschied:

höher	niedriger	nicht signifikant
13	1	2

Schwelle 2 war zum gleichen Zeitpunkt bei 10 WA-Zähnen signifikant höher als bei ihren Vergleichszähnen, zweimal war sie signifikant niedriger, einmal bestand kein signifikanter Unterschied:

höher	niedriger	nicht signifikant
10	2	1

Zum Zeitpunkt U_3 (Tabelle 8) war Schwelle 1 bei 12 WA-Zähnen signifikant höher als bei ihren Vergleichszähnen, einmal war sie niedriger, neun mal bestand kein signifikanter Unterschied:

höher	niedriger	nicht signifikant
12	1	9

Schwelle 2 war zum gleichen Zeitpunkt bei 15 WA-Zähnen signifikant höher als bei ihren Vergleichszähnen, einmal war sie signifikant niedriger, 6 mal bestand kein signifikanter Unterschied:

höher	niedriger	nicht signifikant
15	1	6

In den meisten Fällen weisen die wurzelspitzenamputierten Zähne demnach zum gleichen Zeitpunkt höhere Schwellen als die

Vergleichszähne auf.
Dies zeigt sich auch an den Maxima der Häufigkeitsverteilungen in Abbildung 8 zu den Zeitpunkten U_2 und U_3.
So liegen die Häufigkeitsmaxima der vitalen Vergleichszähne für Schwelle 1 zum Zeitpunkt U_2 wie zum Zeitpunkt U_3 im Bereich von 12 - 17 mN.
Die entsprechenden Maxima bei den WA-Zähnen liegen im Bereich von 17 - 27 mN (U_2), bzw. 13 - 25 mN (U_3).
Für die Schwelle 2 zeigen sich die Maxima nicht so eindeutig.

4.3.4. Mögliche Zusammenhänge der Schwellenentwicklungen beim "WA-Zahn" und beim Vergleichszahn

Die Stabdiagramme der Abbildung 7 zeigen, daß nicht nur die Schwellen der WA-Zähne, sondern auch die vieler Vergleichszähne zu den drei Untersuchungszeitpunkten sehr unterschiedlich sein können.
Häufig zeigen die Schwellenbewegungen von WA- und Vergleichszahn eine große Ähnlichkeit (synchroner Anstieg, synchroner Abfall, Konstanz).
Wie bereits erwähnt, waren Vergleiche der relativen Schwellenbewegungen statistisch nicht durchführbar; sie werden qualitativ beschreibend vorgenommen.
Tabelle 4 (S.100) gibt die relativen Schwellenbewegungen von U_1 nach U_2 und von U_2 nach U_3 qualitativ an.
Danach liegen deutliche Parallelentwicklungen der Schwellen von WA- und Vergleichszahn vor bei den 11 Probanden:

O1, O4, O6, O8, 10, 11 (2 WA-Zähne), 13, 15, 16, (2 WA-Zähne), 17, 21

Teilweise abweichende Entwicklungen zeigen die Schwellen von WA- und Vergleichszahn bei den 7 Probanden:

O2, O3, O5, O7, O9, 12, 14

Unter diesen liegt bei Proband 02 und 07 eine Parallelentwicklung in zumindest einem Intervall (U_1 - U_2 oder U_2 - U_3) vor, bei Proband 14 zumindest bei Schwelle 2.
Keine Beurteilung war bei den Probanden 18, 19, 20 möglich, da nur jeweinmal signifikante Änderungen zwischen den drei Untersuchungszeitpunkten vorlagen.
Vier Vergleichszähne, die keine Parallelentwicklung zeigten, waren atypisch: bei Proband 02 und 20 (im gleichen Quadranten wie WA-Zahn)

bei Proband 07 (vor U_3 wurde eine WA durchgeführt)
bei Proband 09 (Brückenpfeiler)

Ein WA-Zahn, der keine Parallelentwicklung mit seinem Vergleichszahn zeigte, war atypisch:

bei Proband 14 (vor U_3 wurde Stiftkrone zementiert)

Somit sind in der zweiten Gruppe mit teilweise abweichenden Entwicklungen der Schwellen von WA- und Vergleichszähnen die Verhältnisse typisch nur bei den Probanden 02, 05 und 12.

Bei der Gruppe, die deutliche Parallelentwicklungen zwischen WA- und Vergleichszahn zeigte, war nur ein Vergleichszahn atypisch:

bei Proband 11 (weil beide 2er WA-Zähne waren, wurde ein 1er als Vergleichszahn benutzt.)

Ansonsten lagen in dieser Gruppe die Vergleichszähne jeweils symetrisch zu den WA-Zähnen im Nachbarquadranten.
Somit zeigen überdurchschnittlich viele Schwellen von Vergleichszähnen deutliche Parallelentwicklungen zu den Schwellen der jeweiligen WA-Zähne.

4.4. Prozentualer Verlust an Wurzellänge und Ausmaß der Schwellenänderungen bei wurzelspitzenamputierten Zähnen

Abbildung 6 (s.S. 26) zeigt schematisch die Situation auf den Röntgenbildern vor und nach der Wurzelspitzenamputation. Die prozentualen Verluste an Wurzellänge zeigt Tabelle 9 (S.109); sie liegen zwischen 33,57% und 6,74%.
Sie sind abhängig im Wesentlichen von der Ausdehnung des osteolytischen Prozesses an der Wurzelspitze (Parodontitis apicalis, radikuläre Zyste), sowie von den Operationsbedingungen und dem Operateur.

Tabelle 9 gibt außerdem für jeden WA-Zahn die prozentuale Schwellenänderung der Schwelle 1 und der Schwelle 2 an, bezogen auf die Schwellenwerte zum Zeitpunkt U_1 entsprechend 100%.
Zur Überprüfung einer etwaigen Abhängigkeit dieser prozentualen Schwellenänderungen vom prozentualen Verlust an Wurzellänge werden Regressions- und Korrelationskoeffizienten angegeben.
Die Korrelationskoeffizienten ϱ sind hier nahe Null (s. Tabelle 9, S.109); eine Aussage über eine zu erwartende Abhängigkeit läßt sich erst ab einem $\varrho \geq 0{,}5$ machen.
Die Reihe der prozentualen Verluste an Wurzellänge ist also mit der Reihe der prozentualen Änderungen der Schwellenmittelwerte nicht korreliert.
Ein nachweisbarer Zusammenhang zwischen Ausmaß der Wurzelspitzenamputation und daraufhin erfolgender Schwellenänderung besteht nicht.

5. DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Es wurde versucht, taktile Schwellen oberer Frontzähne zu verschiedenen Zeitpunkten zu bestimmen und ihre Beeinflussung durch eine Wurzelspitzenamputation zu ermitteln. Dabei stellte sich heraus, daß eine zunächst erwartete gleichartige Änderung der Schwellenwerte des wurzelspitzenamputierten Zahnes (in Form einer Schwellenerhöhung oder -erniedrigung) bei verschiedenen Probanden nicht stattfindet.

Auch die zum Vergleich herangezogenen, während des Beobachtungszeitraums unverändert gebliebenen und meist vitalen Zähne zeigten zu verschiedenen Untersuchungszeitpunkten recht unterschiedliche Schwellenwerte.

Auch sind die Einzelwerte innerhalb einer Messreihe oft beträchtlichen Schwankungen unterworfen (s. Tab. 1, S. 32 ff.; Abb. 7, S. 32 ff.)

Wir müssen uns daher näher mit den Faktoren befassen, die das Versuchsergebnis beeinflussen,neben der Tatsache, daß an den Versuchszähnen Wurzelspitzenamputationen ausgeführt wurden.

Schon HOLLSTEIN (1933) sieht Abhängigkeiten der Schwellenwerte von Beruf, Intelligenz, Aufmerksamkeit, Ermüdbarkeit und Konzentrationsfähigkeit der Versuchsperson.

Wir können dies aufgrund unserer Versuche im Wesentlichen bestätigen.

Wir gehen davon aus, daß diese Faktoren in der Hauptsache subjektiver Natur sind, da der relativ geringe objektive Fehler, der an anderer Stelle bereits erörtert wurde (s.S.21) für eine so unterschiedliche Entwicklung der Schwellenwerte bei den verschiedenen Probanden nicht in Frage kommt.

Man kann exogene und endogene Faktoren vermuten.

Zu den ersteren könnten die Witterung und die Tageszeit, zu der ein Versuch durchgeführt wurde, auch die Ablenkung des Probanden durch Geräusche und Personen gehören, was

nicht immer ganz auszuschließen war.

Zu den endogenen Faktoren könnten neben Angst, Streß, Konzentrationsmangel z.B. auch Intelligenz aber auch lokale feingewebliche Unterschiede bei den einzelnen Probanden gehören.

Die möglichen genannten Faktoren sind aber derartig mannigfaltig, daß es bei der vorliegenden Probandenzahl nicht sinnvoll wäre, hier Zusammenhänge zu den Schwellenwerten und deren Veränderungen konstruieren zu wollen.
Erwähnt sei nur, daß es bezüglich der genannten Eigenschaften sehr wohl gravierende Unterschiede zwischen den Versuchspersonen gibt. Wir erinnern z.B. daran, daß auf die erste Versuchsreihe bei jedem Probanden unmittelbar die Operation folgte, was je nach Temperament verschieden starke Angst- und Spannungszustände auslöste.

Für die Beurteilung unserer Versuche ist wichtig, daß bei einer solchen Vielfalt subjektiver Einflüsse auf die Meßergebnisse der objektive Fehler der Messapparatur so gering wie möglich gehalten werden konnte (vgl. S. 21)

Hauptvorzüge des "federgefesselten Drehschwingers" (s.S. 16 f) sind die Möglichkeit des prellfreien Aufsetzens des Kraftfühlers auf den Zahn und der Ausgleich von Erschütterungen des Kopfes, die durch Herzschlag, Atembewegungen und Muskeltonus bedingt sind.

Die früher benutzten Methoden wie die von Frey'sche Reizhaare (MÜNCH und SCHRIEVER 1931, GNEUPEL 1951), Gnathodynamometer (ADLER 1947), Federwaage mit Spiralfeder (LÖWENSTEIN und RATHKAMP 1955) (s.S. 9 ff.); ermöglichen keinen konstanten, definierten Kraftanstieg.
Nach den Untersuchungen von JENZ (1976) hat aber die Kraftanstiegsgeschwindigkeit einen großen Einfluß auf die Berührschwelle, und zwar: "Je größer die Kraftanstiegsgeschwindig-

keit, desto größer die Schwelle."
Erklärt wird dies mit einer hydraulischen Dämpfung durch das Desmodont, die bei langsamem Kraftanstieg eine Erniedrigung der Schwellen bewirken soll.
Unsere konstante Kraftanstiegsgeschwindigkeit von 2 mN/sec liegt im unteren Bereich der Jenz'schen Kurve, d.h. es resultieren relativ niedrige Schwellen.
Schon aus diesem Grund ist ein Vergleich mit Werten, die ohne definierte Kraftanstiegsgeschwindigkeit bestimmt wurden, problematisch. Trotzdem liegt die Mehrzahl unserer an vitalen Zähnen bestimmten Mittelwerte (Schwelle 1) in einem Bereich, der dem anderer Autoren entspricht (s. Abb. 8c, S. 47: Histogramm für vitale Zähne, Schwelle 1).

LÖWENSTEIN und RATHKAMP (1955) geben für vitale mittlere obere Schneidezähne 0,948 $\pm$ 0,103 p, für vitale seitliche obere Schneidezähne 1,948 $\pm$ 0,155 p an.
Der Mittelwert für die gesamte Gruppe (vitale 1er und 2er) läge damit bei 1,021 $\pm$ 0,129 p = 9,908 $\pm$ 1,11 mN.
Für diese Gruppe finden wir (lt. Häufigkeitsverteilungen in Abb. 8c, vitale Zähne, Schwelle 1) die meisten Schwellen zwischen 11 und 17 mN (zu allen drei Untersuchungszeitpunkten!)
LÖWENSTEIN und RATHKAMP haben 15 obere 1er und 15 obere 2er untersucht; bei uns war die Anzahl an vitalen 1ern und 2ern insgesamt 19 zum Zeitpunkt U_1 (vor der WA), 14 zum Zeitpunkt U_2 (1 Woche nach der WA), 17 zum Zeitpunkt U_3 (ca. 1/4 Jahr nach der WA).
Daß unsere Werte etwas oberhalb derer von LÖWENSTEIN und RATHKAMP liegen, mag seine Ursache darin haben, daß wir die Messungen an Patienten mit pathologischen Befunden vornahmen, während jene an gesunden Versuchspersonen maßen.
Im übrigen müssen wir der Ansicht von JENZ (1976) und MÜHLBRADT (1976) zustimmen, daß die Schwellenwerte zwischen den einzelnen Probanden so stark streuen, daß die Angabe eines repräsentativen Wertes problematisch ist.

Bei den Streuungen haben wir zu unterscheiden zwischen der Streuung der Einzelwerte einer Meßreihe (s. Tab. 1, S. 72 ff); der interindividuellen Streuung (s.S.44, Abb. 8, S. 46 f.). Erstere weist darauf hin, daß zusätzliche Faktoren in das Meßgeschehen mit eingehen (s.S.57f) Auch die Beeinflussung eines Meßwertes durch die vorausgegangene Messung wäre möglich. Die interindividuelle Streuung drückt sich in den Häufigkeitsverteilungen der Abb. 8 (S.46f) aus. Hier zeigt sich, daß das Druckwahrnehmungsvermögen bei den einzelnen Probanden unterschiedlich entwickelt ist, was mit der Anzahl der parodontalen Presserezeptoren zusammenhängen könnte, die erb- und genbestimmt ist.

Aus subjektiven Angaben der Probanden, sowie aus den objektiv ermittelten Meßergebnissen glauben wir letztlich, ebenso wie JENZ (1976) und MÜHLBRADT (1976), schließen zu können, daß es sich bei der taktilen Schwelle um ein "sensorisches Intervall" handelt, das durch zwei deutlich voneinander abgrenzbare Stufen (Schwelle 1, Schwelle 2) charakterisiert ist. (s.S. 48f)
Diese Erscheinung findet ihre histologische Erklärung in den Untersuchungen von GRIFFIN und SPAIN (1972), sowie von GRIFFIN und HARRIS (1974).
Von ihnen werden zwei, von letzteren drei verschiedene Typen von Pressosensoren beschrieben.
JERGE klassifizierte schon 1966 zwei Typen parodontaler Rezeptoren:

Typ I - langsam adaptierend mit Schwellen zwischen 1 und 3 g (≙9,81 bzw. 29,43 mN).

Typ II - schneller adaptierend mit Schwellen zwischen 2 und 6 g (≙19,62 bzw. 58,86 mN).

In unserem Probandengut fanden wir die Schwelle 1 zwischen 4,10 und 28,85 mN bei vitalen 1ern bzw. zwischen 8,15 und 29,53 mN bei vitalen 2ern; sowie die Schwelle 2 zwischen 15,58 und 56,31 mN bei vitalen 1ern bzw. zwischen 15,59 und 66,33 mN bei vitalen 2ern (s.S. 44).

Diese Werte stimmen in etwa mit den JERGE'schen Intervallen überein.
Auch HANNAM (1969) wies im Tierversuch desmodontale Pressosensoren unterschiedlicher Erregbarkeit nach.
Damit wird der zweistufige Charakter der taktilen Schwelle erklärbar: Zunächst konnten Rezeptoren niedriger Membranschwelle aktiviert werden (unspezifische Empfindung = Schwelle 1), mit zunehmender Belastung dann auch weniger empfindliche Einheiten bis eine sichere Druckempfindung resultiert (Schwelle 2).

JENZ (1976) konnte zeigen, daß die Einzelwerte einer Meßreihe annähernd normalverteilt sind.
Nach unseren Untersuchungen entspricht auch die interindividuelle Streuung der Schwellenmittelwerte zumindest bei der Schwelle 1 annähernd einer Normalverteilung (s. Abb. 8a) und c), S.46f)
Schwelle 2 scheint im Vergleich zu Schwelle 1 noch subjektiver beeinflußt zu sein, da der Übergang von einer unspezifischen Empfindung zu einer definierten durchaus fliessend sein kann und daher schwerer festzulegen ist als der Beginnder allerersten, wenn auch unspezifischen Empfindung.

Aufschlußreich erscheint die Tatsache, daß die Veränderungen beider Schwellen zwischen zwei Untersuchungszeitpunkten sich in den allermeisten Fällen gleichmäßig vollziehen: Das gesamte sensorische Intervall ändert seine Lage; beide Schwellen scheinen in einer Abhängigkeit voneinander zu stehen (s.S.48f; Tab. 4, S. 100 f)
Dies gilt sowohl für die Zähne, an deren apikalen Parodont eine Veränderung vorgenommen wurde (Wurzelspitzenamputation) wie auch für die nicht direkt tangierten Vergleichszähne, für die bestenfalls eine lokal oder neuronal bedingte indirekte Beeinflussung durch die Operation denkbar ist (s.u. S. 66)

HANNAM (1969) und auch ANDERSON (1972) betonen die Bedeutung der Beziehung der Rezeptoren zum parodontalen Gewebe: Die unterschiedliche Rezeptoraktivität soll viel stärker auf ihrer Lokalisation im parodontalen Gewebe beruhen als auf Unterschieden der Rezeptoren selbst.
Die Abhängigkeit beider taktilen Schwellen von einem Eingriff ins parodontale Gewebe wird damit verständlich.
Nach HANNAM (1969) versorgt das ableitende Nervenbündel sowohl Rezeptoren niedriger als auch höherer Aktivität.
Auch diese Aussage paßt zu der gleichförmigen Bewegung von Schwelle 1 und Schwelle 2.

Eine Hauptaufgabe der vorliegenden Arbeit war, herauszufinden, ob und wie sich die taktile Schwelle nach einer Wurzelspitzenamputation am gemessenen Zahn ändert (s.S.49 ff.)
In der Literatur liegen die Aussagen von MARES (1922) und HOLLSTEIN (1933) vor, daß das Tastempfinden an amputierten Zähnen herabgesetzt sei.
Nach KIZIOR (1968) sind im apikalen Wurzeldrittel überdurchschnittlich viele parodontale Mechanorezeptoren lokalisiert.

Bei unseren Versuchen zeigte sich nach Wurzelspitzenamputation keine einheitliche Tendenz der Schwellenänderungen, vielmehr sind nach WA Veränderungen in jeder Richtung möglich (s.S. 49 ff.)
MARES und HOLLSTEIN gewinnen ihre Aussage aus Vergleichen von jeweils zwei wurzelspitzenamputierten Zähnen mit entsprechenden Kontrollzähnen des Nachbarquadranten.
Auf der Basis von 16 entsprechenden Vergleichen zum Zeitpunkt U_2 und 22 zum Zeitpunkt U_3 können wir bestätigen, daß bei der Mehrzahl der amputierten Zähne die taktilen Schwellen nach der Amputation gegenüber nicht amputierten Vergleichszähnen heraufgesetzt sind (s.S. 52; Tab. 7,8 auf S. 107ff)
Dies spricht dafür, daß im apikalen Wurzeldrittel lokalisierte Rezeptoren für die Reizperzeption ausgefallen sind.
Andererseits fällt auf, daß zum Zeitpunkt U_3, also

mindestens 3 Monate nach der WA, gegenüber Zeitpunkt U_2 (eine Woche nach der WA) bedeutend mehr Fälle aufzuzeigen sind, bei denen kein signifikanter Unterschied der Schwellen von wurzelspitzenamputierten Zähnen zu denen von Vergleichszähnen besteht.

Unsere Beobachtungen zum Schwellenverhalten der WA-Zähne nach der WA (s.S. 49 ff.) zeigen, daß nach der WA zwar Veränderungen in jeder Richtung möglich sind, daß aber die Schwellen der WA-Zähne in den jeweils größten Gruppen (ca. die Hälfte der WA-Zähne) direkt nach der WA ansteigen, um bis zu einem Vierteljahr nach WA (Zeitpunkt U_3) wieder abzufallen. (s.S. 51)

Die unterschiedlichen Schwellenentwicklungen der WA-Zähne nach der WA werden verständlich, wenn man bedenkt, daß die Situation dieser Zähne vor der Operation recht verschieden sein kann: Ihr apikales Parodont kann mehr oder weniger geschädigt sein; dies ist röntgenologisch nicht zuverlässig zu erfassen.

Vermutlich wirken sich diese apikalen Prozesse bereits auf die Mechanorezeptoren des benachbarten Bereichs aus.
Ob die Rezeptoren dabei zerstört oder nur temporär geschädigt werden, ist histologisch nicht nachgewiesen.
HOLLSTEIN (1933) stellte an Zähnen mit teilweise zerstörter Wurzelhaut ein geringeres Tastempfinden fest.
ANDERSON (1972) betont, daß es unmöglich sei, parodontale Rezeptoren zu stimulieren ohne Intervention von Geweben, die bei der Überleitung den Reiz abwandeln können.
Also "werden die Sensoren nur indirekt unter Vermittlung des Zahnhalteapparates stimuliert" (MÜHLBRADT 1976).
Ein geschädigtes Desmodont könnte die taktile Schwelle so beeinflussen, daß nach der Ausheilung des apikalen Defektes sogar niedrigere Schwellenwerte zu beobachten sind als zuvor.
Weil diese Beeinflußung aber individuell offensichtlich sehr

verschieden ist, kommt es nicht bei allen Probanden zu der erwähnten Erhöhung und dann folgenden Erniedrigung der Schwellen (von U_1 über U_2 nach U_3).
Eine solche Bewegung ist folgendermaßen zu interpretieren: Durch die Wurzelspitzenamputation wird einerseits eine Anzahl parodontaler Rezeptoren entfernt, die eventuell vorher noch in Funktion waren. Andererseits wird ein pathologischer Prozess im Bereich des apikalen Parodonts zur Ausheilung gebracht, der zuvor parodontale Rezeptoren im Sinne einer Hyposensibilität beeinflußt haben könnte.
Direkt nach der WA ist das desmodontale Gewebe operationsbedingt irritiert, außerdem sind Rezeptoren an der Wurzelspitze entfernt worden: Die taktile Schwelle steigt (Zeitpunkt U_2, s.S. 51)
Nach einer Regenerationsphase mit parodontaler Ausheilung besteht eine nicht mehr gestörte Kopplung zwischen Wurzelhautgeweben und restlichen Rezeptoren: Die taktile Schwelle sinkt wieder (Zeitpunkt U_3, s.S. 51)

Daß die Entfernung apikaler Rezeptoren weder der alleinige noch der ausschlaggebende Faktor für Schwellenänderungen nach einer Wurzelspitzenamputation sein kann, zeigt auch die fehlende Korrelation zum prozentualen Verlust der Wurzellänge. (s.S. 56; Tab. 9, S. 109 f.)
KIZIOR (1968) nahm aufgrund seiner elektrophysiologischen Untersuchungen an unteren Eckzähnen von Katzen an, daß die meisten parodontalen Mechanorezeptoren im apikalen Wurzeldrittel lokalisiert seien.
Unsere Ergebnisse sprechen dafür, daß dies auf menschliche obere Frontzähne nicht übertragen werden kann.
Sie lassen eher eine gleichmäßige Verteilung der Rezeptoren im Desmodont vermuten.

MÜHLBRADT et.al. (1976) hat festgestellt, daß die Berührschwellen parodontal erkrankter Zähne wesentlich höher sind als die gesunder Zähne und daß das parodontale Druckwahrnehmungsvermögen infolge fortschreitender Zerstörung des

Zahnhalteapparates im Verlauf der progressiven marginalen Parodontitis statistisch signifikant nachläßt.
Im Gegensatz zu unseren Messungen konnte bei diesen Untersuchungen eine Korrelation zwischen Verlust an zahntragender Alveolarfläche und taktiler Sensibilität nachgewiesen werden. Die divergierenden Ergebnisse lassen sich nach unserer Ansicht dadurch erklären, daß in beiden Untersuchungen ein linearer Parameter in Form einer Prozentangabe der Wurzelverkürzung bzw. des Abbaus des Parodontiums benutzt wurde, während die Volumenverringerung unberücksichtigt blieb.
In der Apikalregion ist bei gleicher Prozentangabe der Verlust an Desmodontalraum auf Grund des kleineren Wurzelquerschnittes sehr viel geringer als in den cervikalen Wurzelabschnitten, da hier der Wurzelquerschnitt wesentlich größer ist. Somit fallen bei marginalen Abbauprozessen volumenmäßig sehr viel mehr desmodontale Mechanorezeptoren aus als bei apikalen Prozessen bzw. bei Abtragung der Wurzelspitze im Zuge einer Wurzelspitzenamputation. Dies setzt natürlich eine gleichmäßige Verteilung der Rezeptoren über den gesamten Desmodontalraum voraus. Gegenteilige Literaturangaben liegen nicht vor.

Im Abschnitt 4.3.2. (s.S. 51f) wurde gezeigt, daß der erkrankte, marktote Zahn zum Zeitpunkt U_1 (vor der WA) bei 10 von 18 Probanden höhere Schwellen zeigt als entsprechende vitale Vergleichszähne. Da aber die Schwellen der vitalen Zähne zu den anderen Zeitpunkten (U_2 und U_3) z.T. höher liegen, die der WA-Zähne zu späteren Zeitpunkten z.T. tiefer als zum Zeitpunkt U_1, bleiben nur 5 WA-Zähne, die zu jedem Untersuchungszeitpunkt höhere Schwellen als entsprechende vitale Zähne zeigen (s.S. 52)
Das Ergebnis von LÖWENSTEIN und RATHKAMP (1955), daß marktote Zähne signifikant höhere Berührschwellen als vitale aufweisen, können wir demnach nicht bestätigen.

Die taktile Schwelle - auf parodontalen Rezeptorfunktionen beruhend - darf nicht mit möglichen Rezeptoreigenschaften der

Pulpa und der Hartsubstanzen verwechselt werden. Bei wesentlich höheren Drucken wie sie z.B. in Versuchen zur Bestimmung von "Belastungsgrenzen" (MARTINKO 1968) bzw. der "maximalen Beißkraft" (BOLLINGER und LUKAS 1974) zur Anwendung kamen, herrschen völlig andere Bedingungen.
So wären Verwindungen der Zahnhartsubstanzen und eine Reizübertragung via Pulpa in solchen Fällen denkbar.
Hierzu machen unsere Versuche keine Aussage.

Auffällig ist, daß bei vielen Probanden eine Parallelentwicklung der Schwellen von WA-Zahn und entsprechendem Vergleichszahn zu beobachten war. (s.S.54f) Äußere Einflüsse (Wetter, Tageszeit) aber auch innere (Psyche, Angst) könnten hierbei eine Rolle spielen.

Auch eine neurale Beeinflussung des Vergleichszahnes wäre dafür vorstellbar.

HANNAM (1969) beschreibt spontanaktive Einheiten der Pressosensoren, deren elektrophysiologische Reizschwellen konstant niedrig waren.
ANDERSON (1969) meint, daß Spontanaktivität durch die Lokalisation der Sensoren in einem Gebiet kontinuierlicher Spannung bedingt sei.
Über die beschriebenen neuralen Verbindungen[555] müßte sich eine Änderung der Spontanaktivität (durch apikalen Prozess bzw. WA) sowohl auf die zentrale Repräsentation des WA-Zahnes als auch auf die des symmetrisch zur Mittellinie gelegenen Vergleichszahnes auswirken. Dies könnte dann zur gleichsinnigen Änderung der Schwellen von WA-Zahn und Vergleichszahn führen. Die Änderungen müßten sich aber auf den Vergleichszahn weniger stark auswirken, weil seine zentralen Repräsentationsfelder sehr viel stärker von Spontanaktivitäten der eigenen Rezeptoren erregt werden als von denen des symmetrisch gelegenen WA-Zahnes.
Elektrophysiologische Untersuchungen dieser möglichen Zusammenhänge wären dringend wünschenswert.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit stellt einen Beitrag zur Sinnesphysiologie des Parodontiums dar.
An 21 Probanden wurden zu je 3 Untersuchungszeitpunkten taktile Schwellen oberer Frontzähne gemessen.
Im Verlauf der Untersuchungen wurde an jeweils einem der zumindest zwei untersuchten Zähne eines Probanden eine Wurzelspitzenamputation ausgeführt.
Die Untersuchungen erfolgten direkt vor der Wurzelspitzenamputation (U_1), eine Woche postoperativ (U_2) und ca. 3 Monate postoperativ (U_3).

Der für die Messungen benutzte "federgefesselte Drehschwinger" hat sich in den Versuchen bewährt.
Dieses Gerät erlaubt es, den Kraftfühler prellfrei auf den Zahn aufzusetzen und Mikrobewegungen des Zahnes auszugleichen.
Die Messung selbst erfolgte elektronisch über piezo-resistive Halbleiterelemente.

Die Berührschwelle stellte sich als sensorisches Intervall dar, das vom ersten Auftreten unspezifischer Empfindungen (Schwelle 1) bis zu einem ersten deutlichen Druckgefühl (Schwelle 2) reicht. Diese beiden Empfindungsstufen wurden jeweils nacheinander registriert.
Bei vitalen 1ern liegt Schwelle 1 zwischen 4,10 und 28,85 mN;
Schwelle 2 zwischen 15,58 und 56,31 mN.

Bei vitalen 2ern liegt Schwelle 1 zwischen 8,15 und 29,53 mN;
Schwelle 2 zwischen 15,59 und 66,33 mN.

Die Gesamtheit der Schwellen aller vitalen 1er unterscheidet sich nicht signifikant von der aller vitalen 2er.

Die erstellten Häufigkeitsverteilungen der Schwellen aller vitaler Zähne, sowie aller mit Wurzelspitzenamputation (WA) versorgter Zähne ähneln für Schwelle 1 Normalverteilungen.

Für vitale obere Frontzähne liegt das Häufigkeitsmaximum für Schwelle 1 zwischen 12 und 17 mN.

Nach der Wurzelspitzenamputation verändern sich beide Stufen des sensorischen Intervalls im allgemeinen gleichsinnig. Die Richtung der durch die WA bewirkten Schwellenänderungen läßt sich nicht voraussagen: Es kommen Erhöhung, Erniedrigung sowie Gleichbleiben der Schwellen bei den verschiedenen Probanden vor.
Bei knapp der Hälfte der Probanden steigen die Schwellen direkt nach der WA an, um nach ca. 1/4 Jahr wieder abzufallen. Dieses Verhalten erlaubt Rückschlüsse auf die Bedeutung des klinischen Zustandes des Parodontiums für die Erregungsbildung am Rezeptor: Die Entfernung apikaler Mechanorezeptoren durch die Wurzelspitzenamputation ist vermutlich nicht der ausschlaggebende Faktor für die Schwellenänderung.

Die große Mehrzahl der wurzelspitzenamputierten Zähne zeigt nach der WA signifikant höhere Schwellen als unbehandelte Vergleichszähne. Allerdings weist bereits knapp die Hälfte der apikal erkrankten Zähne vor der WA höhere Schwellen als die Vergleichszähne auf.
Bei 16 von 21 Patienten lagen die Schwellen der WA-Zähne zum letzten Untersuchungszeitpunkt tiefer als oder auf gleichem Niveau wie zum Zeitpunkt vor der WA: Etwaige Bedenken gegen die Wurzelspitzenamputation in dem Sinne, daß sie meistens Schwellenerhöhungen und damit evtl. Parafunktionen provozieren würde, sind damit ungerechtfertigt.

Marktote Zähne zeigen in über der Hälfte der Fälle keine höheren Schwellen (zu jedem Untersuchungszeitpunkt) als entsprechende vitale Vergleichszähne.

Eine direkte Korrelation zwischen prozentualem Verlust an Wurzellänge durch Wurzelspitzenamputation und prozentualer Schwellenänderung liegt nicht vor. Der absolute Verlust an

Mechanorezeptoren - bedingt durch Zerstörung von desmodontalem Gewebe - ist damit nicht der entscheidende Faktor für die Schwellenänderung nach WA, da eine Funktionsstörung oder ein Funktionsausfall dieser Rezeptoren schon vor der WA - bedingt durch den pathologischen apikalen Prozess - wahrscheinlich ist.
Es wird vermutet, daß die Beeinflussung der biophysikalischen Eigenschaften des Parodontes durch den pathologischen apikalen Prozeß einerseits und die Wurzelspitzenamputation andererseits den entscheidenden Faktor für die Schwellenänderung darstellt.
Die Versuche lassen eine Häufung von Rezeptoren im apikalen Wurzelbereich als nicht wahrscheinlich erscheinen; vielmehr wird eine gleichmäßige Verteilung der Rezeptoren auf der gesamten Wurzelhautfläche angenommen. Die Reizung der Rezeptoren geschieht durch Erhöhung der Spannung im gesamten Wurzelhautgewebe.

Die Schwellenbewegungen von WA-Zahn und Vergleichszahn zeigen sehr häufig große Ähnlichkeiten. Die Möglichkeit einer neuralen Beeinflussung des Vergleichszahns durch den symmetrisch zu diesem gelegenen WA-Zahn wird diskutiert.

7. ANHANG: TABELLEN DER VERSUCHSERGEBNISSE

Legende zu Tabelle 1:
Aufgenommene Meßwerte der Berührschwellen oberer Frontzähne bei 21 Probanden, sowie arithmetische Mittelwerte, Standardabweichungen, prozentuale Verluste an Wurzellänge nach Wurzelspitzenamputation.
Reihenfolge jeweils: siebenziffrige Kennzahl, Anzahl der Einzelwerte, Mittelwert in mNewton, prozentualer Verlust an Wurzellänge, darunter: Einzelwerte in mN (1mN=0,102p)
Kennzahl: 1. und 2. Ziffer: laufende Probanden-Nr.
3. und 4. Ziffer: Zahn (11, 21, 12 oder 22)
5. Ziffer: Schwelle (1 oder 2)
6. Ziffer: Untersuchungszeitpunkt (1-vor der WA, 2-ca. 1 Woche nach der WA, 3-ca. 1/4 Jahr nach der WA)
7. Ziffer: 1- WA-Zahn, 2- Vergleichszahn

Tabelle 1

0111111	15	11.520	2.731	8.170						
7.832	9.301	13.706	13.706	9.790	14.196	7.832	9.301	15.664	10.769	
14.685	13.706	8.611	13.706	9.790						
0111121	8	17.806	4.386	8.170						
20.070	13.217	13.706	25.455	21.049	14.685	14.685	19.581			
0111131	11	12.701	4.211	8.170						
15.664	21.832	7.343	14.685	15.664	8.028	10.769	11.748	10.084	14.098	
9.790										
0111231	11	35.485	7.010	8.170						
35.245	39.161	24.769	32.504	39.944	28.196	45.231	47.972	33.581	31.427	
32.308										
0121122	7	20.448	4.022	0.000						
18.699	19.501	18.308	22.909	13.902	24.280	25.455				
0121132	10	9.585	2.891	0.000						
11.748	7.832	15.664	6.168	11.259	8.126	6.951	9.790	7.343	10.965	
0121232	10	30.105	6.640	0.000						
31.525	28.392	38.182	45.231	27.707	27.315	26.238	23.595	26.434	26.434	
0222111	10	10.515	1.815	12.620						
11.063	11.063	7.832	11.748	13.511	12.042	10.769	7.832	9.301	9.986	
0222121	7	29.958	0.904	12.620						
28.588	30.350	29.371	29.371	30.350	31.329	30.350				

0222131 10 34.315 5.941 12.620
43.273 37.497 32.508 35.539 29.371 36.518 43.175 25.749 30.546 29.175

0222231 10 44.683 6.090 12.620
50.910 48.952 39.161 43.371 40.923 45.819 55.119 34.462 46.798 41.315

0212112 10 8.155 1.291 0.000
5.874 7.832 6.853 7.343 7.539 9.790 8.518 9.105 9.790 8.909

0212122 7 13.804 4.358 0.000
16.154 15.664 13.413 18.895 16.741 7.636 8.120

0212132 11 8.544 3.091 0.000
5.874 9.790 11.455 11.650 7.343 6.657 7.343 7.832 3.720 7.636
14.685

0212232 11 19.242 5.644 0.000
14.881 16.839 17.916 18.308 16.644 13.315 32.308 20.755 17.035 16.448
27.217

0312111 10 23.154 1.583 33.570
23.986 24.476 24.476 23.986 23.007 19.581 24.476 23.497 21.539 22.518

0312121 11 23.007 2.590 33.570
23.497 21.049 20.560 21.539 22.028 23.986 22.518 29.371 25.455 20.560
22.518

0312131 10 34.736 7.357 33.570
35.245 35.049 36.028 43.077 48.756 25.259 32.112 26.923 27.413 37.497

0312231	9	42.436	7.343	33.570						
42.882	42.098	43.175	50.910	54.924	33.385	37.007	33.091	44.448		
0311122	9	11.172	1.852	0.000						
13.706	8.909	12.238	8.811	9.594	13.706	10.769	11.357	11.455		
0311132	9	10.008	2.959	0.000						
13.511	13.902	11.748	9.790	9.399	5.874	6.462	7.539	11.846		
0311232	10	18.249	3.962	0.000						
24.476	21.832	16.937	15.664	17.133	15.958	12.923	14.098	20.168	23.301	
0411111	10	29.146	3.529	0.000						
31.818	33.874	27.217	36.224	27.119	25.749	27.609	27.609	27.413	26.825	
0411121	6	57.681	4.996	0.000						
47.483	59.721	59.721	59.721	59.721	59.721					
0411131	10	30.115	6.641	0.000						
29.371	24.280	33.091	25.455	21.343	32.308	33.091	39.161	22.714	40.336	
0411231	10	73.085	13.157	0.000						
79.008	75.190	94.966	67.357	51.203	61.483	60.994	75.483	77.050	88.113	
0421112	8	33.691	5.733	0.000						
38.965	35.245	27.413	44.056	34.853	30.839	28.392	29.763			
0421122	5	53.122	8.711	0.000						
42.000	58.742	45.427	60.700	58.742						

0421132 8 29.249 7.472 0.000
19.776 23.790 23.693 30.154 36.628 42.784 31.133 26.630

0421232 8 69.389 8.419 0.000
69.315 55.805 66.182 63.050 81.260 68.728 70.490 80.281

0522111 12 14.800 3.453 15.380
15.077 23.497 16.448 12.532 16.448 14.490 13.217 15.860 11.748 11.748
10.280 16.252

0522121 10 37.800 9.463 15.380
29.567 35.637 35.833 23.888 23.497 45.035 45.525 46.993 46.014 46.014

0522131 11 40.737 8.737 15.380
45.035 45.133 56.588 49.245 37.497 31.329 41.119 31.525 27.413 46.014
37.203

0522231 12 62.242 14.518 15.380
95.945 69.511 75.385 53.847 71.469 57.077 55.805 58.742 44.350 45.329
66.868 52.574

0512122 15 12.173 1.968 0.000
11.748 11.357 11.944 8.615 9.399 11.553 12.434 14.490 15.664 14.098
13.902 13.706 9.686 12.532 11.161

0512132 10 8.635 2.506 0.000
7.343 7.832 11.944 4.895 9.790 11.650 7.832 10.084 10.084 4.895

0512232 10 21.764 3.244 0.000
20.070 26.923 18.797 18.602 20.560 26.238 22.518 18.895 25.259 19.776

0521112 9 12.700 2.842 0.000
11.944 15.958 13.119 9.399 8.224 12.140 12.140 16.448 15.469

0521122 6 9.306 1.875 0.000
10.280 11.846 6.266 8.615 9.986 9.203

0612111 13 14.693 3.706 19.230
20.560 12.727 11.161 10.965 21.539 10.671 12.140 12.238 18.699 13.706
14.490 14.635 17.427

0612121 12 27.984 4.586 19.230
22.126 26.923 34.756 25.651 21.734 25.357 32.308 30.546 23.497 34.462
29.567 28.861

0612131 11 13.012 2.599 19.230
10.574 13.804 15.469 14.685 8.126 9.790 16.350 13.706 14.196 14.685
11.748

0612231 11 40.047 6.230 19.230
35.049 48.756 38.574 38.378 37.007 38.280 54.336 42.098 34.560 39.455
34.462

0622112 11 13.206 1.437 0.000
12.042 10.769 15.660 13.315 12.532 13.902 14.490 12.336 12.336 14.685
13.217

0622122 13 17.743 3.626 0.000
23.688 17.535 13.815 17.535 20.755 19.679 15.762 14.685 14.098 17.818
24.965 16.350 15.473

0622132 9 16.774 5.734 0.000
15.664 14.979 16.448 25.259 11.663 9.790 26.434 13.511 17.818

0622232 9 49.419 11.789 0.000
41.119 50.714 60.[illegible] 66.574 37.203 34.560 62.854 41.119 49.931

0611112 5 16.389 2.902 0.000
15.664 14.685 15.175 14.881 21.539

0611122 10 14.225 3.267 0.000
11.748 17.916 17.[illegible]35 18.602 10.769 14.881 9.301 11.259 14.588 16.154

0611132 7 13.702 5.084 0.000
15.469 10.769 9.007 9.986 11.259 23.399 16.448

0611232 7 45.133 13.284 0.000
68.238 37.007 56.784 31.818 33.091 44.644 44.350

0722111 6 33.222 11.416 7.300
45.035 46.014 36.224 19.091 21.539 31.427

0722121 12 21.588 8.552 7.300
16.644 24.084 25.[illegible]59 39.161 27.707 32.308 14.196 11.357 15.664 17.818
22.714 12.140

0722131 12 6.910 3.299 7.300
7.832 2.448 2.937 3.133 8.615 7.832 10.769 10.769 2.154 8.811
7.832 9.790

0722221 7 58.812 19.861 7.300
50.910 41.119 66.[illegible]85 42.098 43.077 76.364 92.029

```
 0722231      12      32.920      4.027      7.300
  41.903 29.371 27.609 33.287 36.028 30.154 34.266 31.525 29.763 37.693
  31.623 31.818

 0712112       9      35.484     11.004      0.000
  42.882 45.525 34.266 31.721 45.525 45.623 37.203 17.623 18.993

 0712122      12      16.725      6.745      0.000
  11.553 10.378 14.685 25.455 24.769 14.685 10.378 16.252 13.217 19.581
  29.958  9.760

 0712132       9      20.070      4.805      0.000
  18.602 14.000 19.091 27.707 23.105 19.581 19.581 25.651 13.315

 0712222      10      40.698      8.923      0.000
  32.700 44.840 26.923 47.483 43.371 48.952 26.238 41.707 43.861 50.910

 0712232      10      51.967     12.396      0.000
  50.910 42.196 35.637 72.448 70.099 43.273 62.462 44.056 47.189 51.399

 0821111      10      11.347      3.915     16.600
  10.867  8.322 12.140 18.406  8.615 15.273 15.371 10.084  8.420  5.972

 0821121      13      21.750      5.722     16.600
  23.497 23.497 18.797 14.490 25.651 13.804 14.685 23.497 31.818 17.623
  28.881 26.434 20.670

 0821131      13      12.886      4.989     16.600
  11.748  8.322  7.832  7.049 12.532 18.406  8.811 18.993 20.951  7.832
  10.965 15.664 18.406
```

0821211 10 21.852 4,707 16.600
17.329 24.280 18,504 15.469 16.937 20.560 27,217 23,497 26.140 28,588

0821221 14 30.336 6,474 16.600
30.350 35.735 27.707 20.755 32.504 24.476 22.322 37,007 38,965 29,371
41.315 25.259 24.672 34.266

0821231 13 22.126 6,268 16.600
24.084 14.685 15.677 12.727 20,560 23.301 18,993 24,476 31.916 33.777
18,993 25.553 23,497

0811112 11 13.164 2,879 0,000
13.315 12.727 15,273 13.706 15.664 17,329 16.056 12,140 9,301 8,028
11.259

0811122 10 12.150 3,484 0,000
6.364 9.790 11,259 15.567 10.965 14,392 9.301 18,112 14,685 11,063

0811132 13 11.319 3,121 0,000
10.182 5.874 12.727 3,811 10,574 12,825 8,126 10,769 17,916 13,217
15.175 9.790 11,161

0811212 9 26.619 3,318 0,000
28.294 24.182 32,602 21,441 27,217 23,693 26,140 26,630 29,371

0811222 11 24.004 5,293 0,000
19.581 20.755 22,518 25.455 37,203 22,322 28,686 20,266 25,161 23,693
18,406

0811232 13 16.975 3.554 0.000
14.881 13.217 19.581 13.706 14.098 18.308 11.748 14.881 24.084 19.189
20.755 18.993 17.231

0911111 10 8.341 5.477 30.180
1.958 2.937 1.958 1.958 9.888 10.769 15.077 12.336 12.825 13.706

0911121 10 11.983 4.492 30.180
12.140 19.483 17.427 15.958 9.790 8.322 13.217 7.636 9.986 5.874

0911131 11 4.575 1.602 30.180
3.916 2.937 3.231 5.385 3.720 4.210 3.133 6.364 6.070 3.525
7.832

0911211 6 21.033 5.862 30.180
10.769 20.755 27.315 19.189 25.651 22.518

0911221 9 23.975 6.381 30.180
30.644 36.714 25.651 23.986 21.049 21.147 16.252 22.513 17.818

0911231 11 16.590 3.321 30.180
18.602 16.154 17.623 14.196 12.042 20.070 12.532 12.923 16.644 20.560
21.147

0921122 10 4.102 3.190 0.000
4.895 1.958 9.301 4.895 1.958 2.154 2.154 1.469 2.154 10.084

0921132 10 6.001 3.177 0.000
4.406 6.755 5.672 2.350 2.741 5.874 6.657 2.937 10.574 11.748

```
0921222      10      15.214       5.003       0.000
 15.762 11.748 13.217 25.455 17.623 12.727 15.664  6.853 13.511 19.581

0921232      10      15.694       4.522       0.000
 14.881 20.560 18.602  7.343 13.902 18.014 16.056  9.203 20.951 17.427

1022111       9      13.065       4.327      29.730
  8.322 15.664  6.870 11.553 10.280 18.797 13.609 15.469 17.818

1022121      12      41.038      13.211      29.730
 29.371 26.434 22.518 31.329 41.119 53.847 50.910 26.434 44.056 58.742
 51.889 55.805

1022131      10      10.955       3.737      29.730
  9.301 15.273 12.923 16.644  8.224 14.490 10.574  9.007  4.895  8.224

1022211       9      69.870       8.295      29.730
 64.812 63.833 60.700 61.679 77.931 85.176 69.707 69.022 75.973

1022221      13     140.288      28.608      29.720
 86.938 91.050112.589176.226142.938148.813137.064144.897130.211153.708
161.540166.435171.330

1022231      10      79.556       4.172      29.730
 81.847 77.343 81.945 82.043 79.987 88.113 73.134 77.833 76.364 76.952

1012112      10      19.140       4.205       0.000
 22.322 19.581 18.406 22.322 15.860 17.818 10.769 25.455 22.224 16.644

1012132       9      10.530       2.509       0.000
  6.462 10.769  8.420 11.553  7.832 11.357 14.392 11.259 12.727
```

```
1012212      10      66.329       9.174       0.000
 54.826 48.168 77.833 66.574 70.294 76.462 63.441 72.252 67.357 66.085

1012232       9      61.407      10.192       0.000
 45.525 52.476 52.182 64.127 62.658 65.595 62.071 68.141 79.889

1112111      12      19.295       5.849      17.860
  8.909 15.567 22.714 32.112 19.091 15.860 21.539 21.539 24.769 17.818
 16.154 15.469

1112121      13      36.465       5.371      17.860
 24.280 31.329 38.965 39.455 31.133 43.371 35.539 35.441 41.903 34.462
 36.812 42.784 38.574

1112131      15      10.339       4.637      17.860
  3.720  8.811  8.028 13.511 20.560  5.287  6.853  6.657  7.343 14.685
  9.790 11.846 17.623  9.790 10.574

1112211      12      28.669       7.281      17.860
 18.797 25.455 35.049 45.819 29.665 27.413 31.329 30.056 31.623 26.434
 19.874 22.518

1112221      13      57.326       3.871      17.860
 51.203 60.700 58.457 59.917 53.161 60.700 51.595 54.532 63.343 55.609
 60.700 59.133 56.588

1112231      15      20.233       4.378      17.860
 17.818 18.504 17.623 23.105 32.700 22.028 17.623 14.685 15.371 23.497
 19.581 19.679 23.301 18.406 19.581

1122111      10      11.308       2.978      16.600
  7.832  6.853 12.532 13.902  8.615 11.650 11.063 13.609 10.574 16.448
```

```
1122121       10      48.540       3.696      16.600
 46.798 45.035 48.952 54.826 52.770 46.534 51.203 50.518 43.861 44.938

1122131       13      12.381       2.337      16.600
 11.944 10.260  8.811 12.727 10.378 13.706 15.664 17.133 12.532  9.790
 11.748 13.706 12.532

1122211       10      19.718       1.995      16.600
 17.623 18.014 19.483 22.811 18.406 19.581 19.385 19.581 18.602 23.693

1122221       10      66.966       6.014      16.600
 62.462 55.022 72.252 73.623 71.469 66.378 66.966 72.252 60.700 68.532

1122231       13      20.808       2.563      16.600
 21.147 16.154 17.231 21.343 19.581 21.539 22.518 24.084 21.832 17.231
 23.497 23.497 20.653

1121112       10      14.078       3.173       0.000
 11.553 12.923  8.615 13.706 18.308 18.308 12.532 12.434 14.979 17.427

1121132       12       8.224       2.225       0.000
  8.322  8.420  5.674  5.674  8.518  4.308 10.574 10.965  9.203  7.832
 11.748  7.049

1121212       10      23.800       2.771       0.000
 22.518 20.560 23.497 22.518 27.119 28.831 23.497 19.776 24.672 24.965

1121232       12      15.583       2.383       0.000
 20.560 16.252 13.717 12.727 14.979 12.042 14.881 18.014 15.371 15.664
 17.623 15.664
```

1211111 10 36.361 5.701 10.410
28.392 29.371 35.443 31.623 39.161 33.273 36.909 43.567 32.895 43.077

1211121 11 28.623 6.708 10.410
25.455 20.560 39.749 21.849 25.455 24.476 28.063 29.979 36.714 37.986
29.371

1211131 12 13.388 4.006 10.410
12.140 11.161 19.776 7.636 8.615 8.224 17.623 16.356 15.371 17.525
13.804 12.727

1211211 10 56.872 10.879 10.410
40.830 58.938 44.938 62.406 63.037 74.708 47.777 64.615 48.364 64.616

1211221 11 47.109 4.634 10.410
44.644 41.413 56.294 50.714 42.898 44.742 43.469 45.035 49.343 51.987
48.462

1211231 13 27.792 5.725 10.410
37.007 31.329 37.595 22.909 34.266 20.755 22.028 27.707 26.825 25.553
28.979 23.283 23.007

1221122 10 10.740 2.151 0.000
10.280 15.077 12.032 10.476 7.832 9.986 8.811 10.965 8.909 12.532

1221132 10 12.737 2.117 0.000
13.706 13.119 11.459 11.363 10.574 13.217 11.944 10.280 16.154 16.856

1221222 10 22.420 3.527 0.000
22.518 31.525 23.693 21.637 20.266 19.972 21.245 22.028 18.602 22.714

1221232 10 24.535 4.645 0.000
31.623 25.651 20.653 21.539 16.406 22.518 22.028 22.224 29.371 31.133

1311111 10 15.704 3.000 28.570
20.755 14.979 18.602 14.685 14.685 12.042 17.818 17.818 14.490 11.161

1311121 9 10.051 2.900 28.570
16.448 9.790 10.280 11.748 5.874 9.790 8.615 9.790 8.126

1311131 10 54.336 3.850 28.570
53.651 48.168 55.605 55.805 54.238 55.413 56.490 50.224 62.071 51.497

1311211 10 37.849 9.363 28.570
36.420 50.518 50.910 45.231 36.224 29.077 41.413 37.791 26.434 24.476

1311221 10 20.726 3.264 28.570
18.406 26.630 24.476 18.993 17.916 24.476 18.406 18.014 21.147 18.797

1311231 10 72.605 7.304 28.570
75.092 59.329 83.022 69.511 69.022 77.637 71.665 64.029 78.910 77.833

1321112 11 10.449 1.358 0.000
9.692 10.182 10.769 9.790 9.399 10.574 9.790 11.748 13.706 10.671
8.615

1321122 8 8.199 3.949 0.000
6.266 5.483 8.615 4.895 3.133 10.769 11.748 14.685

1321132 10 17.897 2.777 0.000
11.046 18.406 21.649 17.035 17.623 21.637 19.972 18.112 16.252 17.035

1321212 11 19.447 2.535 0.000
19.385 18.406 22.420 17.427 15.958 16.644 16.644 22.518 21.539 21.832
21.147

1321222 8 17.512 2.987 0.000
13.021 14.881 19.091 16.350 15.371 19.776 20.560 21.049

1321232 10 29.136 3.519 0.000
27.021 33.679 31.916 26.825 29.860 34.560 30.546 27.217 24.084 25.651

1412111 10 24.574 4.474 22.730
24.476 21.147 31.329 32.602 21.245 25.749 21.049 20.560 26.630 20.951

1412121 8 43.261 7.116 22.730
39.944 29.567 44.252 40.238 50.224 50.518 41.609 49.735

1412131 11 36.580 8.251 22.730
26.728 29.371 45.525 45.035 33.287 39.259 29.371 52.868 31.623 32.112
37.203

1412211 11 53.678 12.628 22.730
55.903 36.224 74.406 55.609 70.196 68.532 48.952 41.119 43.665 50.322
45.525

1412221 9 83.348 9.457 22.730
89.777 79.301 83.022 73.819 79.497102.798 88.113 82.728 71.078

1412231 11 71.193 6.635 22.730
57.077 65.399 74.211 73.623 71.861 77.343 73.134 73.427 68.826 66.280
81.945

1422112 9 14.870 2.662 0.000
12.434 17.133 14.794 13.021 16.252 12.727 20.560 13.315 14.098

1422132 11 25.570 6.658 0.000
26.042 12.532 22.420 26.238 18.210 28.783 20.853 35.245 27.315 31.133
32.504

1422212 10 54.302 9.044 0.000
73.427 55.609 48.163 64.224 60.798 39.749 46.798 47.972 52.868 51.203

1422232 11 50.634 6.658 0.000
55.022 36.028 45.427 56.126 52.476 55.609 42.882 58.742 54.826 53.749
52.084

1511111 9 22.659 6.106 7.760
23.301 15.664 33.287 21.343 20.266 16.644 30.350 25.455 17.623

1511121 10 15.449 3.092 7.760
15.762 17.623 11.650 10.476 14.979 17.623 11.748 18.602 18.406 17.623

1511131 10 15.292 1.564 7.760
16.448 14.881 13.413 15.371 13.413 15.860 15.175 17.329 13.413 17.623

1511211 10 39.220 11.026 7.760
51.203 37.693 59.427 36.028 38.965 21.049 46.993 37.986 34.266 28.588

1511221 10 26.424 2.848 7.760
27.413 30.644 24.769 21.441 24.084 28.392 23.790 29.371 27.707 26.630

1511231 10 26.532 2.708 7.760
21.147 29.763 26.923 25.646 27.021 28.392 23.497 29.860 25.455 27.413

1521112 9 14.381 2.966 0.000
16.937 14.685 11.455 9.399 12.042 13.706 16.644 16.154 18.406

1521122 7 13.357 1.321 0.000
11.944 15.469 14.490 12.727 13.511 11.846 13.511

1521132 10 17.221 3.916 0.000
12.923 16.154 23.688 14.294 15.664 24.182 17.231 17.329 17.133 13.413

1521212 9 29.969 3.724 0.000
31.818 26.238 24.476 27.511 28.490 30.350 31.035 33.287 36.518

1521222 7 23.427 1.489 0.000
24.476 24.965 25.457 21.734 21.930 23.007 22.518

1521232 10 28.088 4.383 0.000
23.790 22.518 34.658 34.070 25.944 32.993 26.728 28.490 27.217 24.476

1522111 10 21.294 3.403 32.350
18.993 23.497 21.745 19.385 19.189 16.644 29.175 22.518 21.734 20.560

1522121 10 15.195 2.732 32.350
17.623 12.923 12.042 18.602 14.783 15.664 12.727 19.189 11.944 16.448

1522131 9 18.210 3.538 32.350
17.133 20.070 24.476 14.098 17.231 15.077 20.364 21.147 14.294

1522211 10 44.614 4.373 32.350
45.035 45.035 49.637 48.952 44.448 35.735 49.931 40.728 44.350 42.294

1522221 10 23.409 2.130 32.350
25.944 20.755 20.364 24.378 24.672 23.888 22.518 26.728 21.539 23.301

1522231 10 34.844 2.871 32.350
32.112 37.986 39.161 31.035 35.833 34.070 36.610 36.616 34.070 30.937

1512112 10 12.052 2.393 0.000
13.413 14.490 14.685 8.811 10.574 10.476 13.706 14.490 8.518 11.357

1512132 7 17.818 2.740 0.000
18.014 16.741 14.685 15.077 22.028 17.427 20.755

1512212 10 26.140 3.688 0.000
25.455 28.392 31.721 22.518 27.217 27.217 22.714 29.567 19.385 27.217

1512232 7 29.916 3.060 0.000
30.742 29.371 26.738 26.728 32.602 28.979 34.756

1611111 11 31.062 7.173 6.740
25.259 42.098 41.119 27.413 19.679 37.203 28.881 27.119 28.392 37.105
27.413

1611121 10 31.740 5.253 6.740
29.860 31.329 27.217 26.042 35.245 26.434 42.979 35.049 28.979 34.266

1611211 10 53.710 6.136 6.740
56.784 64.420 51.693 46.014 59.938 53.651 53.161 52.574 56.784 43.077

1611221 11 46.949 5.508 6.740
45.329 46.993 43.469 46.993 41.119 46.014 41.315 58.742 51.693 41.903
52.868

1612111 9 20.897 2.592 24.630
19.385 22.420 25.455 19.581 22.518 21.637 21.539 16.448 19.091

```
1612121      10      21.832      5.890      24.630
 14.685 16.448 17.618 19.374 35.245 21.734 21.734 19.776 24.769 26.238

1612211       9      44.872      5.297      24.630
 54.826 40.140 41.511 46.112 50.812 47.091 41.119 43.077 39.161

1612221      10      38.407      6.349      24.630
 30.839 33.189 39.161 42.294 53.847 36.028 37.986 34.364 39.161 37.203

1621112      11      14.018      3.089       0.000
 14.196 13.511 10.769 15.371  9.790  9.986 11.748 15.762 17.623 17.818
 17.623

1621122      11      14.383      2.490       0.000
 15.273 15.664 17.818 12.140 14.294 15.860 15.860 11.357 10.182 12.532
 17.231

1621212      11      32.709      3.526       0.000
 33.287 35.441 30.937 31.818 34.266 27.707 29.763 30.350 32.798 32.308
 41.119

1621222      11      28.766      3.772       0.000
 29.763 32.895 31.035 25.846 28.392 28.392 35.245 23.986 22.909 26.630
 31.329

1711111      10      17.946      3.348      25.730
 17.231 20.560 25.455 17.623 15.860 15.664 16.448 15.860 14.196 20.560

1711121      11      10.511      2.555      25.730
  9.790  9.301 15.567  9.203  8.211  9.790  9.105  9.203 15.664  9.007
 10.182
```

1711131 10 18.053 5.665 25.730
14.490 28.881 17.623 23.497 21.147 19.581 19.581 11.161 11.650 12.923

1711211 10 37.565 7.035 25.730
36.812 51.889 46.993 29.371 37.203 36.224 31.329 36.518 31.133 38.182

1711221 11 25.855 4.029 25.730
19.483 20.853 26.434 32.504 26.923 30.350 27.609 28.783 25.944 22.811
22.714

1711231 10 68.082 4.956 25.730
65.399 69.903 58.742 75.875 73.623 70.980 68.924 67.945 64.616 64.812

1721112 7 28.853 6.220 0.000
41.119 31.329 24.280 25.455 26.923 30.154 22.714

1721122 10 13.824 4.662 0.000
15.064 14.490 6.070 11.748 16.056 10.280 8.811 16.839 16.056 22.224

1721132 11 13.172 2.601 0.000
19.581 15.664 14.098 9.790 12.923 13.217 12.238 11.748 11.748 12.140
11.748

1721212 7 45.819 8.601 0.000
59.721 52.084 44.350 37.497 43.469 48.952 34.658

1721222 10 31.368 6.733 0.000
35.833 25.944 20.364 27.609 32.014 26.728 28.392 35.637 39.063 42.098

1721232 11 56.312 2.834 0.000
49.343 54.434 59.026 58.154 58.546 57.469 58.154 54.140 56.392 57.959
55.805

1812111 9 24.226 7.451 26.350
34.462 30.937 31.329 24.769 13.511 16.644 27.413 16.644 22.322

1812121 10 18.592 4.987 26.350
11.553 20.070 16.056 19.189 25.455 18.014 12.336 18.014 27.413 17.818

1812131 10 20.765 4.955 26.350
17.133 26.434 18.797 16.644 17.035 18.602 21.539 31.916 17.623 21.930

1812211 10 58.076 39.291 26.350
167.414 58.154 57.763 49.441 38.182 42.294 53.063 39.161 36.616 38.672

1812221 10 39.200 5.347 26.350
30.350 38.672 47.483 43.469 43.371 37.399 34.658 42.098 41.413 33.091

1812231 10 32.347 6.885 26.350
29.175 31.133 30.350 29.371 25.651 37.203 33.091 44.644 21.930 40.923

1822112 10 7.313 2.369 0.000
5.385 6.657 8.224 8.322 6.462 12.238 3.525 7.049 6.070 9.203

1822122 9 8.974 2.151 0.000
8.713 13.511 10.578 9.399 9.105 8.322 8.615 6.364 6.364

1822132 12 7.718 2.690 0.000
9.399 14.098 7.245 7.539 4.699 6.657 6.853 5.189 10.769 7.636
4.699 7.832

1822212 10 21.500 2.887 0.000
18.406 21.539 25.455 19.531 21.539 21.930 18.895 19.679 27.413 20.560

1822222 9 22.159 3.449 0.000
23.497 22.322 22.322 23.595 21.637 18.014 28.979 22.126 16.937

1822232 12 15.591 3.144 0.000
18.014 20.755 20.755 14.881 12.727 14.392 15.273 12.532 13.902 13.902
18.406 11.553

1922111 11 15.193 5.469 11.990
9.790 17.133 14.081 9.497 18.014 12.923 11.455 9.790 14.881 26.434
22.322

1922121 9 26.466 9.760 11.990
11.748 21.734 20.560 42.392 25.553 17.623 37.497 30.056 31.035

1922131 10 40.189 17.744 11.990
42.784 19.189 13.717 43.861 49.931 16.644 41.609 61.679 56.980 56.001

1922211 11 38.262 7.419 11.990
27.413 42.686 37.497 27.609 39.161 39.553 38.868 31.035 39.357 51.889
45.819

1922221 9 46.645 11.260 11.990
22.518 33.874 51.399 56.784 49.931 49.245 53.651 46.993 55.413

1922231 8 74.835 19.211 11.990
92.029 55.609 37.888 91.050 71.665 83.218 88.896 78.322

1912112 9 24.563 5.163 0.000
25.455 19.581 19.581 19.581 27.413 26.140 19.972 33.287 30.056

1912122 7 24.210 3.627 0.000
19.776 27.413 23.497 19.091 24.672 27.902 27.119

1912132 11 19.954 8.249 0.000
11.748 23.986 13.315 35.735 29.665 23.399 16.839 10.574 21.539 10.378
22.322

1912212 10 49.588 7.080 0.000
49.931 38.182 40.728 57.273 47.972 43.567 57.175 48.952 57.273 54.826

1912222 7 58.602 9.898 0.000
43.077 56.980 57.273 56.490 64.616 75.777 56.001

1912232 11 48.996 8.154 0.000
40.826 44.056 39.161 64.224 60.308 52.574 41.217 47.385 54.826 46.602
47.777

2011111 9 36.322 11.349 15.880
33.287 20.364 53.553 54.826 34.266 31.916 37.203 35.245 26.238

2011121 6 41.821 14.431 15.880
29.763 26.042 42.784 55.217 62.266 34.353

2011131 11 61.919 10.068 15.880
58.742 58.742 81.455 60.210 62.658 61.679 80.281 56.784 56.784 48.952
54.826

2011211 10 77.715 10.894 15.880
79.301 73.623 84.601 78.127 88.113 84.980 61.875 80.281 90.071 56.784

2011221 8 69.891 11.207 15.880
56.784 63.050 66.083 62.364 77.148 83.218 67.525 62.952

2011231 11 32.657 11.468 15.680
82.239 87.525 102.193 80.770 70.322 82.239 102.798 80.085 73,623 66,378
72.448

2012112 8 26.241 5.300 0.000
22.028 35.245 26.728 23.790 18.602 30.742 23.693 28.783

2012122 9 29.524 4.874 0.000
27.413 31.916 35.245 35.539 25.455 20.951 32.308 26,140 30,839

2012132 11 25.909 3.899 0.000
18.797 27.413 31.035 25.455 27.413 28.098 31.818 24,672 20,755 24,769
24.769

2012212 8 53.528 9.793 0.000
40.630 56.196 56.294 66.574 42.294 65.595 46,602 54,042

2012222 10 48.276 8.807 0.000
35.245 45.329 60.700 47.483 58.252 36.420 58,742 47,777 48,364 44,448

2012232 11 36.740 4.564 0.000
29.371 34.951 37.399 37.007 42.098 39.161 45.231 36,126 30,350 37,203
35.245

2121111 11 19.785 2.747 21.420
22.909 26.630 19.189 19.972 19.091 18.112 17.623 16,839 18,895 18,797
19.581

2121121 9 18.732 2.279 21.420
22.322 21.930 18.406 17.329 20.070 15.664 17.231 17.035 18,602

2121131 12 14.579 2.566 21.420
16.937 12.727 11.748 20.070 13.706 13.021 13.119 18.602 13.217 13.511
14.588 13.706

2121211 11 33.643 5.856 21.420
48.756 39.944 34.266 32.112 32.700 32.308 30.546 30.937 28.979 29.175
30.350

2121221 9 30.829 3.308 21.420
36.126 32.700 35.930 27.217 30.154 29.371 28.783 28.783 28.392

2121231 12 32.912 3.261 21.420
33.287 35.245 35.637 40.140 31.329 34.070 33.287 32.504 31.818 29.665
30.546 27.413

2111112 10 17.133 1.088 0.000
18.014 18.602 17.623 15.860 15.664 17.916 17.916 17.427 15.664 16.644

2111122 10 16.918 1.778 0.000
17.035 12.727 18.014 17.623 17.035 16.937 15.664 19.385 16.644 18.112

2111132 11 10.689 2.410 0.000
13.902 14.685 11.748 10.867 10.769 6.853 7.343 10.769 10.084 11.748
8.811

2111212 8 30.228 1.986 0.000
29.371 29.371 30.937 28.588 29.588 34.462 31.329 29.175

2111222 9 26.695 1.525 0.000
29.273 24.476 27.407 27.413 27.021 27.413 26.434 25.846 24.672

2111232 11 26.469 4.252 0.000
29.371 32.700 28.992 33.287 19.581 22.126 26.434 26.336 25.749 23.693
23.497

Tabelle 2

Zahntyp	Schwelle	für U_1: MW (n; S)	für U_2: MW (n; S)	für U_3: MW (n; S)
vit.1er	1	15,625 (8; 5,667)	12,599 (7; 2,998)	13,987 (6; 3,815)
	2	29,799 (7; 8,352)	25,295 (6; 4.829)	28,761 (6;14,680)
vit.2er	1	16,042 (7; 7,540)	19,131 (4; 9,408)	16,578 (7; 7,751)
	2	45,194 (6;17,544)	43,012 (3;18,783)	40,547 (6;16,484)
vit.1er u. 2er	1	17,680 (13; 8,213)	17,769 (15;11,268)	16,142 (17; 6,538)
	2	36,904 (13;15,965)	31,201 (9;13,463)	34,654 (12;16,104)
WA- 1er	1	21,836 (11;10,077)	24,195 (11;14,826)	23,784 (10;19,253)
	2	42,162 (9;16,006)	35,788 (9;15,901)	43,661 (8;26,220)
WA- 2er	1	18,941 (13; 6,480)	30,133 (13;10,393)	23,261 (12;13,018)
	2	44,720 (8;16,105)	61,949 (8;36,709)	47,688 (7;26,400)
WA- 1er u. 2er	1	20,268 (24; 8,260)	27,411 (24;12,691)	23,499 (22;15,739)
	2	43,366 (17;16,653)	48,099 (17;29,952)	45,540 (15;25,432)

Legende: Gesamtmittelwerte der Berührschwellen oberer Frontzähne. Es bedeuten:
Schwelle 1: erste unspezifische Empfindung
Schwelle 2: klares Druckgefühl
U_1, U_2, U_3: die drei Untersuchungszeitpunkte
MW : Gesamtmittelwert in mNewton
n : Anzahl der herangezogenen Einzelmittelwerte
S : Standardabweichung in mNewton

Tabelle 3

Vergleich von Gesamtschwellenmittelwerten

		U_1	U_2	U_3
vit.1er - vit.2er				
	Schwelle1	-	-	-
	Schwelle2	s.	-	-
WA- 1er - WA- 2er				
	Schwelle1	-	-	-
	Schwelle2	-	s.	-
WA- 1er - vit.1er				
	Schwelle1	-	s.	s.
	Schwelle2	s.	s.	-
WA- 2er - vit.2er				
	Schwelle1	-	-	-
	Schwelle2	-	-	-
WA- 1er u. 2er - vit.1er u. 2er				
	Schwelle1	-	s.	s.
	Schwelle2	-	s.	-

Legende: Prüfung auf Identität oder Verschiedenartigkeit der Gesamtmittelwerte aus Tabelle 2.
Bei Homogenität der zu vergleichenden Varianzen wurde der t- Test herangezogen, bei Inhomogenität der Aspin-Welch- Test. Es bedeuten:
s. : signifikanter Unterschied mit 5% Irrtumswahrscheinlichkeit
- : keine Signifikanz

Legende zu Tabelle 4:
Qualitative Änderungen der Berührschwellen unter dem Einfluß der Wurzelspitzenamputation.
Es wurden Varianzanalysen nach Bartlett sowie eine Beurteilung linearer Kontraste nach Scheffé durchgeführt.
Es bedeuten:

WA-Z : WA-Zahn, der nach der Untersuchung U_1 einer Wurzelspitzenamputation unterzogen wurde
V-Z : nicht behandelter Vergleichszahn
+, - : signifikanter Auf- bzw. Abstieg der Berührschwelle (Irrtumswahrscheinlichkeit 5%)
(+), (-) : nicht signifikanter Schwellenauf- bzw. -abstieg
= : Berührschwelle praktisch gleich geblieben
/ : kein Vergleich durchgeführt (Schwelle 2 wurde erst ab Proband 07 bestimmt; einige Vergleichszähne wurden zu nur zwei Zeitpunkten untersucht.)

Tabelle 4

Proband	Zahn	Änderung v. U_1 n. U_2 / Schwelle1	Schwelle2	Änderung v. U_2 n. U_3 / Schwelle1	Schwelle2
01	WA-Z11	+	/	-	/
	V-Z21	/	/	-	/
02	WA-Z22	+	/	(+)	/
	V-Z12	+	/	-	/
03	WA-Z12	=	/	+	/
	V-Z11	/	/	=	/
04	WA-Z11	+	/	-	/
	V-Z21	+	/	-	/
05	WA-Z22	+	/	=	/
	V-Z12	/	/	(-)	/
06	WA-Z12	+	/	-	/
	V-Z22	(+)	/	(-)	/
	V-Z11	=	/	=	/
07	WA-Z22	-	/	-	-
	V-Z12	-	/	=	/
08	WA-Z21	+	+	-	-
	V-Z11	=	=	=	-
09	WA-Z11	(+)	(+)	-	-
	V-Z21	/	/	(+)	-
10	WA-Z22	+	+	-	-
	V-Z12	/	/	-	(-)
11	WA-Z12	+	+	-	-
	WA-Z22	+	+	-	-
	V-Z21	/	/	-	-
12	WA-Z11	-	-	-	-
	V-Z21	/	/	=	-
13	WA-Z11	-	-	+	+
	V-Z21	(-)	(-)	+	+
14	WA-Z12	+	+	(-)	-
	V-Z22	/	/	(+)	(-)
15	WA-Z11	-	-	=	(+)
	V-Z21	(-)	-	(+)	+
	WA-Z22	-	-	(+)	+
	V-Z12	/	/	+	+
16	WA-Z12	=	-	/	/
	WA-Z11	=	-	/	/
	V-Z21	=	-	/	/
17	WA-Z11	-	-	+	+
	V-Z21	-	-	=	+
18	WA-Z12	=	(-)	=	(-)
	V-Z22	=	=	=	-
19	WA-Z22	(+)	(+)	(+)	+
	V-Z12	=	(+)	(-)	(-)
20	WA-Z11	(+)	(-)	+	(+)
	V-Z12	(+)	(-)	(-)	-
21	WA-Z21	=	(-)	-	(+)
	V-Z11	=	(-)	-	=

Legende zu Tabelle 5:
Vergleich der Berührschwellenmittelwerte zu den drei Untersuchungszeitpunkten vor und nach der Wurzelspitzenamputation (jeweils für jeden Zahn, getrennt für Schwelle 1 und Schwelle 2, wobei Schwelle 2 erst ab Proband 07 bestimmt wurde). Es wurden Varianzanalysen nach Bartlett sowie Beurteilungen linearer Kontraste nach Scheffé durchgeführt.
Es bedeuten:

U : Schwellenmittelwert zum Untersuchungszeitpunkt 1, 2 oder 3
>,< : Größenverhältnis der verglichenen Werte (größer als, bzw. kleiner als)
s. : signifikanter Unterschied, in Klammern dahinter: Irrtumswahrscheinlichkeit 1%, bzw. 5%
- : keine Signifikanz

Tabelle 5

Proband	Zahn	U		U	Signifikanz Schwelle1	Schwelle2
01	WA-Z11	1	<	2	s.(1%)	
		1		3	-	
		2	>	3	s.(5%)	
	V-Z21	2	>	3	s.(1%)	
02	WA-Z22	1	<	2	s.(1%)	
		1	<	3	s.(1%)	
		2		3	-	
	V-Z12	1	<	2	s.(1%)	
		1		3	-	
		2	>	3	s.(1%)	
03	WA-Z12	1		2	-	
		1	<	3	s.(1%)	
		2	>	3	s.(1%)	
	V-Z11	2	<	3	-	
04	WA-Z11	1	<	2	s.(1%)	
		1		3	-	
		2	>	3	s.(1%)	
	V-Z21	1	<	2	s.(1%)	
		1		3	-	
		2	<	3	s.(1%)	
05	WA-Z22	1	<	2	s.(1%)	
		1	<	3	s.(1%)	
		2		3	-	
	V-Z12	2	>	3	s.(1%)	
	V-Z21	1	<	2	s.(5%)	
06	WA-Z12	1	<	2	s.(1%)	
		1		3	-	
		2	>	3	s.(1%)	
	V-Z22	1		2	-	
		1		3	-	
		2		3	-	
	V-Z11	1		2	-	
		1		3	-	
		2		3	-	
07	WA-Z22	1	>	2	s.(5%)	
		1	>	3	s.(1%)	
		2	>	3	s.(1%)	s.(1%)
	V-Z12	1	>	2	s.(1%)	
		1	>	3	s.(1%)	
		2		3	-	s.(5%)
08	WA-Z21	1	<	2	s.(1%)	s.(1%)
		1		3	-	-
		2	>	3	s.(1%)	s.(1%)
	V-Z11	1		2	-	-
		1	>	3	-	s.(1%)
		2	>	3	-	s.(1%)

Proband	Zahn	U		U	Signifikanz Schwelle1	Schwelle2
09	WA-Z11	1		2	-	-
		1		3	-	-
		2	>	3	s.(1%)	s.(5%)
	V-Z21	2		3	-	-
10	WA-Z22	1	<	2	s.(1%)	s.(1%)
		1		3	-	-
		2	>	3	s.(1%)	s.(1%)
	V-Z12	1	>	3	s.(1%)	-
11	WA-Z12	1	<	2	s.(1%)	s.(1%)
		1	>	3	s.(1%)	s.(1%)
		2	>	3	s.(1%)	s.(1%)
	WA-Z22	1	<	2	s.(1%)	s.(1%)
		1		3	-	-
		2	>	3	s.(1%)	s.(1%)
	V-Z21	1	>	3	s.(1%)	s.(1%)
12	WA-Z11	1	>	2	s.(5%)	s.(5%)
		1	>	3	s.(1%)	s.(1%)
		2	>	3	s.(1%)	s.(1%)
	V-Z21	2		3	-	-
13	WA-Z11	1	>	2	s.(1%)	s.(1%)
		1	<	3	s.(1%)	s.(1%)
		2	<	3	s.(1%)	s.(1%)
	V-Z21	1		2	-	-
		1	<	3	s.(1%)	s.(1%)
		2	<	3	s.(1%)	s.(1%)
14	WA-Z12	1	<	2	s.(1%)	s.(1%)
		1	<	3	s.(1%)	s.(1%)
		2	>	3	-	s.(5%)
	V-Z22	1	<	3	s.(1%)	-
15	WA-Z11	1	>	2	s.(1%)	s.(1%)
		1	>	3	s.(1%)	s.(1%)
		2		3	-	-
	V-Z21	1	>	2	-	s.(1%)
		1		3	-	-
		2	<	3	-	s.(5%)
	WA-Z22	1	>	2	s.(1%)	s.(1%)
		1		3	-	-
		2	<	3	-	s.(5%)
	V-Z12	1	<	3	s.(1%)	s.(5%)
16	WA-Z11	1	>	2	-	s.(5%)
	WA-Z12	1	>	2	-	s.(5%)
	V-Z21	1	>	2	-	s.(5%)
17	WA-Z11	1	>	2	s.(1%)	s.(1%)
		1	<	3	-	s.(1%)
		2	<	3	s.(1%)	s.(1%)
	V-Z21	1	>	2	s.(1%)	s.(1%)
		1		3	s.(1%)	s.(1%)
		2	<	3	-	s.(1%)

Proband	Zahn	U		U	Signifikanz Schwelle1	Schwelle2
18	WA-Z12	1		2	-	-
		1		3	-	-
		2		3	-	-
	V-Z22	1		2	-	-
		1	>	3	-	s.(1%)
		2	>	3	-	s.(1%)
19	WA-Z22	1		2	-	-
		1	<	3	s.(1%)	s.(1%)
		2	<	3	-	s.(1%)
	V-Z12	1		2	-	-
		1		3	-	-
		2		3	-	-
20	WA-Z11	1		2	-	-
		1	<	3	s.(1%)	-
		2	<	3	s.(1%)	-
	V-A12	1		2	-	-
		1	>	3	-	s.(1%)
		2		3	-	s.(1%)
21	WA-Z21	1		2	-	-
		1	>	3	s.(1%)	-
		2	>	3	s.(1%)	-
	V-Z11	1		2	-	-
		1	>	3	s.(1%)	s.(5%)
		2	>	3	s.(1%)	-

Tabelle 6

Proband	WA-Z	vit.V-Z	Signifikanz Schwelle1	Schwelle2
02	22	12	s. >	
03	12	11	s. >	
05	22	12(U_2)	-	
		12(U_3^2)	-	
06	12	11	-	
08	21	11	-	s. <
09	11	21(U_2)	-	-
		21(U_3^2)	-	-
10	22	12	s. <	-
11	12	21	s. >	-
	22	21	-	s. <
12	11	21(U_2)	s. >	s. >
		21(U_3^2)	s. >	s. >
13	11	21	s. >	s. >
14	12	22	s. >	-
15	11	21	s. >	s. >
16	11	21	s. >	s. >
	12	21	s. >	s. >
17	11	21	s. <	s. <
18	12	22	s. >	s. >
19	22	12	s. <	s. <
20	11	12	s. >	s. >
21	21	11	s. >	-

Legende: Vergleich von Berührschwellen marktoter, zur Wurzelspitzenamputation vorgesehener Zähne mit denen vitaler Vergleichszähne.
Bei den WA-Zähnen wurde nur der Untersuchungszeitpunkt U_1 (vor der WA) herangezogen, ebenso bei den Vergleichszähnen, mit Ausnahme von drei extra bezeichneten Vergleichen.
Bei Homogenität der zu vergleichenden Varianzen wurde der t- Test herangezogen, bei Inhomogenität der Aspin-Welch- Test. Es bedeuten:
s.>, s.< : Berührschwelle des WA- Zahns signifikant größer, bzw. signifikant kleiner als die des Vergleichszahns (Irrtumswahrscheinlichkeit 5%)
- : keine Signifikanz
Anmerkung: Bei den nicht aufgeführten Probanden waren die Vergleichszähne devital.

Tabelle 7

Proband	WA-Z	V-Z	Signifikanz Schwelle1	Schwelle2
01	11	21	s.>	
02	22	12	s.>	
03	12	11	s.>	
04	11	21	s.>	
05	22	12	s.>	
06	12	22	s.>	
	12	11	s.>	
07	22	12	-	s.>
08	21	11	s.>	s.>
09	11	21	s.>	s.>
12	11	21	s.>	s.>
13	11	21	-	-
15	11	21	s.>	s.>
16	11	21	s.>	s.>
	12	11	s.>	s.>
17	11	21	s.<	s.<
18	12	22	s.>	s.>
19	12	22	-	s.<
20	22	12	s.>	s.>
21	11	12	-	s.>

Legende: Vergleich der Berührschwellen der WA- Zähne mit denen der jeweiligen Vergleichszähne zum Untersuchungszeitpunkt U_2 (eine Woche nach der WA). Bei Homogenität der zu vergleichenden Varianzen wurde der t- Test herangezogen, bei Inhomogenität der Aspin-Welch- Test. Es bedeuten:

s.>, s.< : Berührschwelle des WA- Zahns signifikant größer, bzw. signifikant kleiner als die des Vergleichszahns (Irrtumswahrscheinlichkeit 5%)

\- : keine Signifikanz

Anmerkung: Bei den nicht aufgeführten Probanden ist der Vergleichszahn zum Zeitpunkt U_2 nicht gemessen worden.

Tabelle 8

Proband	WA-Z	V-Z	Signifikanz Schwelle1	Schwelle2
01	11	21	s.>	-
02	22	12	s.>	s.>
03	12	11	s.>	s.>
04	11	21	-	-
05	22	12	s.>	s.>
06	12	22	s.<	s.<
	12	11	-	-
07	22	12	-	-
08	21	11	-	s.>
09	11	21	-	-
10	22	12	-	s.>
11	12	21	-	s.>
	22	21	s.>	s.>
12	11	21	-	-
13	11	21	s.>	s.>
14	12	22	s.>	s.>
15	11	21	-	-
	22	12	-	s.>
17	11	21	s.>	s.>
18	12	22	s.>	s.>
19	22	12	s.>	s.>
20	11	12	s.>	s.>
21	21	11	s.>	s.>

Legende: Vergleich der Berührschwellen der WA- Zähne mit denen der jeweiligen Vergleichszähne zum Untersuchungszeitpunkt U_3 (ca. 1/4 Jahr nach der WA). Bei Homogenität der zu vergleichenden Varianzen wurde der t- Test herangezogen, bei Inhomogenität der Aspin-Welch- Test. Es bedeuten:

s.>, s.< : Berührschwelle des WA- Zahns signifikant größer, bzw. signifikant kleiner als die des Vergleichszahns (Irrtumswahrscheinlichkeit 5%)

\- : keine Signifikanz

Anmerkung: Bei dem nicht aufgeführten Probanden 16 fand zum Zeitpunkt U_3 keine Messung statt.

Tabelle 9: a)für Schwelle1

Proband	Wurzellängenverlust in %	Schwellenänderung in % $v.U_1$ $n.U_2$	/ $v.U_1$ $n.U_3$
01	8,17	+ 54,57	+ 10,25
02	16,62	+184,91	+226,35
03	33,57	- 0,63	+ 50,02
05	15,38	+155,41	+175,25
06	19,23	+ 90,46	- 11,44
07	7,30	- 35,02	- 79,20
08	16,60	+ 91,68	+ 13,56
09	30,18	+ 43,66	- 45,16
10	29,73	+214,11	- 16,15
11(WA-Z12)	17,86	+ 88,99	- 46,42
11(WA-Z22)	16,60	+329,26	+ 9,42
12	10,41	- 21,28	- 63,18
13	28,57	- 35,99	+246,01
14	22,73	+ 76,05	+ 48,86
15(WA-Z11)	7,76	- 31,82	- 32,51
15(WA-Z22)	32,35	- 28,64	- 14,48
16(WA-Z11)	6,74	+ 2,18	
16(WA-Z12)	24,63	+ 4,48	
17	25,73	- 41,43	+ 0,60
18	26,35	- 23,26	- 14,28
19	11,99	+ 74,20	+164,53
20	15,88	+ 15,14	+ 70,47
21	21,42	- 5,32	- 26,31

Prozentuale Wurzellängenverluste / prozentuale Schwellenänderungen von U_1 nach U_2:
Regressionskoeffizient: -0,007
Korrelationskoeffizient: -0,080

Prozentuale Wurzellängenverluste / prozentuale Schwellenänderungen von U_1 nach U_3:
Regressionskoeffizient: +0,005
Korrelationskoeffizient: +0,058

Legende zu den Tabellen 9 a) und 9 b):
Prozentuale Verluste der Wurzellänge bedingt durch Wurzelspitzenamputation.
Prozentuale Änderungen des Schwellenmittelwertes jedes WA-zahns für die Untersuchungszeitpunkte U_2 und U_3 (bezogen auf den Schwellenmittelwert für U_1 entsprechend 100%).
Regression und Korrelation zwischen prozentualen Verlusten der Wurzellänge und prozentualen Änderungen der Schwellenmittelwerte. (Siehe auch Abschnitt 3.4. über statistische Auswertung.)

Tabelle 9: b)für Schwelle2

Proband	Wurzellängenverlust in %	Schwellenänderung in % $v.U_1$ $n.U_2$ / $v.U_1$ $n.U_3$	
08	16,60	+ 38,83	+ 1,25
09	30,18	+ 13,99	- 21,12
10	29,73	+100,78	+ 13,86
11(WA-Z12)	17,86	+ 99,96	- 29,43
11(WA-Z22)	16,60	+239,62	+ 5,53
12	10,41	- 17,17	- 51,15
13	28,57	- 45,24	+ 31,82
14	22,73	+ 55,28	+ 32,63
15(WA-Z11)	7,76	- 32,63	- 32,35
15(WA-Z22)	32,35	- 47,53	- 21,90
16(WA-Z11)	6,74	- 12,59	
16(WA-Z12)	24,63	- 14,41	
17	25,73	- 31,17	+ 81,24
18	26,35	- 32,50	- 44,30
19	11,99	+ 21,91	+ 95,58
20	15,88	- 10,07	+ 6,36
21	21,42	- 8,37	- 2,17

Prozentuale Wurzellängenverluste / prozentuale Schwellenänderungen von U_1 nach U_2:
Regressionskoeffizient: -0,010
Korrelationskoeffizient: -0,098

Prozentuale Wurzellängenverluste / prozentuale Schwellenänderungen von U_1 nach U_3:
Regressionskoeffizient: +0,033
Korrelationskoeffizient: +0,232

Legende s. o. bei Tabelle 9 a).

8. LITERATURVERZEICHNIS

1. ADLER, P. : Sensibility of teeth to loads applied in different directions. J. dent. Res. 26, 279-289, 1947

2. ANDERSON, D.J.: Periodontal Sensory Mechanisms. in: Biology of the Periodontium, Academic Press, London 1969, S. 345-361

3. BERKELBACH van der SPRENKEL, H.: Mikroskopical investigation of the innervation of the tooth and its surroundings. J. Anat. (Lond.) 70, 233-241, 1936

4. BOCK, O. : Über die Innervation des Dentins. Dtsch. zahnärztl. Z. 15, 838-848 u. 889-897, 1960

5. BOLLINGER, K. und LUKAS, D.: Belastungsempfindung oberer Eckzähne Dtsch. zahnärztl. Z. 29, 283-288, 1974

6. BRÄNNSTRÖM, M.: Sensitivity of dentine. Oral Surg. 21, 517-526, 1966

7. CASPERS, H.: Zentralnervensystem. in: KEIDEL, W.D.: Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie. Thieme Verlag, Stuttgart, 1972, S. 450-501

8. CATTON, W.T.: Mechanorezeptor Function Physiol. Rev. 50, 297-318, 1970

9. FEKETE, A.: Physiologie der Rezeptoren. in: BALINT, P.: Lehrbuch der Physiologie, Budapest, 1963, S. 847-946

10. FRÖHLICH, E.: Entwicklung und Morphologie der Weichgewebe des Parodontiums. Dtsch. zahnärztl. Z. 13, 221-240, 1958

11. GNEUPEL, J.: Die Empfindlichkeit der Zähne gegenüber Druck.
Med. Diss., Berlin 1951

12. GRIFFIN, C.J. and HARRIS, R.: Innervation of human periodontium.
Aust. dent. J. 19, 51-56, 174-181, 255-260, 326-331, 1974

13. GRIFFIN, C.J. and SPAIN, H.: Organisation and vasculature of human periodontal ligament mechanoreceptors.
Arch. oral Biol. 17, 913-921, 1972

14. HANNAM, A.G.: Response of dental mechanoreceptors to dynamic loading.
J. dent. Res., 1269, 1967

15. HANNAM, A.G.: The response of periodontal mechanoreceptors in the dog to controlled loadings of the teeth.
Arch. oral Biol. 14, 781-791, 1969

16. HANNAM, A.G. and MATTHEWS, B.: Reflex jaw opening in response to mechanical stimulation of the teeth in the cat.
Arch. oral Biol. 14, 415-419, 1969

17. HASSENSTEIN, D.: Über die Lokalisation von Druckreizen auf den Zähnen.
Med. Diss., Berlin 1951

18. HELD, A.J.: Die mikroskopische Struktur des Zahnes. zitiert nach: BOCK, O.: Über die Innervation des Dentins. Dtsch. zahnärztl. Z. 15, 838-848, 1960

19. HENATSCH, D.: Allgemeine Elektrophysiologie der erregbaren Strukturen. in:
LANDOIS-ROSEMANN, H.-U.: Lehrbuch der Physiologie des Menschen. 2. Band.
Verlag Urban und Schwarzenberg München/ Berlin 1962, S. 547-628

20. HENSEL, H.: Sinnesphysiologie in der Mundhöhle. in:
Die Zahn- Mund- und Kieferheilkunde II
Verlag Urban und Schwarzenberg München/ Berlin 1958, S. 447-466

21. HENSEL, H.: Somato-viscerale Sensibilität. in: KEIDEL, W.D.: Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie
Thieme-Verlag, Stuttgart, 1972, S. 436-437

22. HOLLSTEIN, W.: Untersuchungen über das "Dickenunterscheidungsvermögen".
Dtsch. Mschr. Zahnheilk. 51, 385-403, 1933

23. JENZ, K.-P.: Die Berührschwelle menschlicher Zähne. Eine neurophysiologische Untersuchung zur Funktion parodontaler Pressosensoren.
Med. Diss., Tübingen 1976

24. JERGE, C.R.: The organisation and function of the trigeminal mesencephalic nucleus.
J. Neurophysiol. 26, 379-392, 393-402, 1963
zitiert nach: ANDERSON, D.J.: Periodontal Sensory Mechanisms.

25. JERGE, C.R.: The neurologic mechanisms underlying cyclic jaw movements.
J. prosth. Dent. 14, 667-681, 1964

26. KAWAMURA, Y. and WATANABE, M.: Studies on oral sensory thresholds.
Med. J. Osaka Univ. 10, 291-301, 1960

27. KEIDEL, W.D.: Informationsverarbeitung. in: KEIDEL, W.D.: Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie.
Thieme-Verlag, Stuttgart, 1972, S. 369-388

28. KIZIOR, J.E., CUOZZO, J.W., and BOWMAN, D.C.: Functional and histologic assesment of the sensory innervation of the periodontal ligament of the cat.
J. dent. Res. 47, 59-64, 1968

29. KRAFT, E.: Raum- und Ordnungsgefühl und Tastsinn in der Mundhöhle.
Dtsch. zahnärztl. Z. 17, 365-369, 1962

30. LEWINSKY, W. and STEWART, D.: The innervation of the

periodontal membrane.
J. Anat. (Lond.) 71, 98-102, 1937
zitiert nach: GRIFFIN, C.J. and HARRIS, R.: Innervation of human periodontium.

31. LOEWENSTEIN, W.R. and RATHKAMP, R.: A study on the pressoreceptive sensibility of the tooth.
J. dent. Res. 34, 287-294, 1955

32. Lullies, H.: Zur Motorik der Kaufunktion und der Parafunktionen.
Schweiz. Mschr. Zahnheilk. 70, 87-96, 1960

33. MARES, E.: Über den Drucksinn der Zähne.
Med. Diss., Marburg 1922

34. MARTINKO, V.: Bestimmt das Desmodont (Wurzelhaut) die Belastungsgrenze des Zahnes?
Dtsch. zahnärztl. Z. 23, 910-914, 1968

35. MATTHEWS, B.: Action potentials from dental mechanoreceptors in the dog.
J. dent. Res. 44, 1167, 1965

36. MEYER, W.: Histologie der Zähne und des Gebisses.
in: Die Zahn- Mund- und Kieferheilkunde I
Verlag Urban und Schwarzenberg München/ Berlin, 1958, S. 253-296

37. MÜHLBRADT, L.: Die taktile Schwelle und ihre neurophysiologische Bedeutung
Freier Vortrag, Tübingen 1976

38. MÜHLBRADT, L., JENZ, K.-P. und LUKAS, D.: Die Berührschwelle bei gesunden und erkrankten Parodontien.
Dtsch. zahnärztl. Z. 31, 406-410, 1976

39. MÜNCH, J. und SCHRIEVER, H.: Die Zähne als Sinneswerkzeug.
Zeitschr. f. Biol. 91, 1931

40. NESS, A.R.: The mechanoreceptors of the rabbit mandibular incisor.
J. Physiol. (Lond.) 126, 475-493, 1954

41. PARTSCH, C.: Über Wurzelresection.
Dtsch. Mschr. Zahnheilk. 17, 348-367, 1899

42. PFAFFMANN, C.: Afferent impulses from the teeth due to pressure and noxious stimulation.
J. Physiol. (Lond.) 97, 207-219, 1939

43. PFAFFMANN, C.: Afferent impulses from the teeth resulting from a vibratory stimulus.
J. Physiol. (Lond.) 97, 220-232, 1939

44. RASCH, Ch.: Über die Lokalisation von Druckempfindungen, die von den Zähnen ausgelöst werden.
Med. Diss., Berlin 1951

45. SACHS, L.: Statistische Auswertungsmethoden.
Springer Verlag, Berlin 1972

46. SAUERWEIN, E.: Zahnerhaltungskunde.
Thieme-Verlag, Stuttgart, 1972, S. 22-23

47. SCHNELL, H.: Myopathien im Kauorgan.
Zahnärztl. Praxis 27, 241-244, 1976

48. SCHULTE, W.: Die Muskelentspannung zur Therapie des Kiefergelenks - zugleich ein Beitrag zur Steuerung des muskulo-mandibulären Bewegungssystems.
Dtsch. zahnärztl. Z. 22, 858-873, 1967

49. SCHULTE, W.: Okklusionsstörungen, Kaumuskulatur und Kiefergelenke.
Der Freie Zahnarzt 16, 17-25, 1972

50. SCHULTE, W.: Besprechung der Richtlinien für systematische Befunderhebung und Behandlung der Parodontopathien.
Begleittext zur Vorlesung, Tübingen 1972, S. 4

51. SCHUMACHER, G.H.: Anatomie und Physiologie des Parodontiums.
Dtsch. Stomat. 12, 305-330, 1962

52. SIGMUND, C.: Die Empfindungen der Zähne.
Dtsch. Vtljschr. Zahnheilk. 7, 179-184, 1867

53. SIIRILÄ, H.S. and LANE, P.: The tactile sensibility of periodontium to slight axial loadings of the teeth.
Acta odont. scand. 21, 415-429, 1963

54. SIMPSON, H.E.: The innervation of the periodontal membane as observed by the apoxestic technique.
Periodont. 37, 374-376, 1966

55. SKRAMLIK, E. von: Die Zähne als Vermittler von Empfindungen.
Dtsch. Stomat. 2, 326-335, 1952

56. STARKE, R.: Über die Unterscheidung von zwei Druckreizorten auf normalen Zähnen.
Med. Diss., Berlin 1952

57. STEINER, J.: Über das Empfindungsvermögen der Zähne des Menschen.
Zentralbl. f. Physiol. 15, 585, 1902

58. STEWART, D.: Some aspects of the innervation of the teeth.
Proc. roy. Soc. Med. 20, 1675-1685, 1927

59. THEIL, E.: Bis zu welchem Grade kann die Tastfähigkeit der menschlichen Zahnreihenglieder festgestellt werden?
Dtsch. Mschr. Zahnheilk. 49, 270-278, 1931

60. TRYDE, G., FRYDENBERG, C. and BRILL, N.: An assesment of the tactile sensibility in human teeth.
Acta odont. scand. 20, 233-256, 1962

61. TÜRKHEIM, H.: Untersuchung über das Empfindungsvermögen des Dentins.
Med. Diss., Hamburg 1920

62. WILKIE, J.K.: Preliminary observations on pressor sensory thresholds of anterior teeth.
J. dent. Res. 43, 962, 1964

63. WILSON, A.S. and SILVA, D.G.: Ultrastructure of the phrenic nerve.
Nature 208, 5011 u. 707-708, 1965
zitiert nach: GRIFFIN, C.J. and HARRIS,R.: Innervation of human periodontium.

64. YAMADA, M.: Interactions between the tactile sense and the mobility of the tooth.
J. dent. Res. 46, 1256, 1967

An dieser Stelle möchte ich Herrn Professor Dr. W. Schulte für die Überlassung des Themas und Herrn Dr. L. Mühlbradt für die freundliche Unterstützung recht herzlich danken.

L E B E N S L A U F

Am 14. September 1953 wurde ich, Thomas Herholz, als Sohn des Zahnarztes Dr. Gerhard Herholz und dessen Ehefrau Eva Herholz, geb. Hoppe, in Oldenburg in Holstein geboren.
Ich wurde römisch-katholisch getauft.
Ab 1960 besuchte ich für vier Jahre die Grundschule in Dahme / Ostsee und wechselte 1964 zum Freiherr-vom-Stein-Gymnasium in Oldenburg über.
Nach Abschluß der Reifeprüfung im Mai 1972 nahm ich zum Wintersemester 1972 das Studium der Zahnmedizin an der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen auf.
Dort legte ich am 14.12.1977 das zahnärztliche Staatsexamen ab. Seit Februar 1978 bin ich als zahnärztlicher Assistent tätig.